



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT LMD

Spécialité: *Energies Renouvelables*

Par :

M^{elle} SIFI Ibtissem

Sur le thème

Étude, Modélisation et Conception d'un Générateur Thermoélectrique

Soutenue publiquement le - - / - - /2020 à Tlemcen devant le jury composé de :

M ^r Nasr Eddine Chabane Sari	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M ^{me} Nassera Ghellai	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
M ^{me} Amaria Bensaoula	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
M ^r Boumedienne Lasri	Professeur	Université de Saida	Examineur
M ^r Houari Ameur	Professeur	Université de Naama	Examineur

Unité de recherche Matériaux et énergies Renouvelables (URMER)
BP, 119, 13000 Tlemcen- Algérie

DEDICACE

Je dédie se travail à

*Mes très chers parents pour leur sacrifice, amour, tendresse et
encouragement.*

Mon cher frère : Amine.

Toute ma famille

Mes meilleurs amis

M^{lle} IBTISSEM- SIFI

Remerciements

Le travail présenté dans cette these a été effectué à l'Unité de Recherche Matériaux et Énergies Renouvelables (URMER), Université Abou BekrBelkaid – Tlemcen.

En premier je remercie DIEU tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

*Je remercie mon encadreur **M^{me} N.GHELLAI** Professeur au département de Physique, Faculté des Sciences à l'Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen-, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses encouragements et ses conseils judicieux tout le long de la réalisation de ce mémoire. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*En premier lieu, toute ma connaissance à **M^r N.E.CHABANE-SARI** Professeur à l'Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen pour avoir accepté de présider le jury.*

***M^{me} A.BENSAOULA** Professeur à l'Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen-, tout en lui exprimant notre profond respect pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

***M^r B.LASRI** Professeur à l'Université de Saida, tout en lui exprimant notre profond respect pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

***M^r H.AMEUR** MCA à l'Université de Naama, tout en lui exprimant notre profond respect pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants du département de physique et tous les étudiants de ma promotion.

Je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Liste des Symboles

Numéro	Variable	Unité en SI (Système International)	Description
1	C_max	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité thermique maximal</i>
2	C_min	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité thermique minimale</i>
3	C _{th}	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité du circuit thermique</i>
4	C _e	Joule/ Volt (j/V)	<i>Capacité du circuit électrique</i>
5	C _v	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité du circuit thermique</i>
6	dQ _s	Watt /Mètre ² W.m ⁻²	<i>Quantité de chaleur émise ou absorbée</i>
7	dQ _v	Watt /Mètre ³ W.m ⁻³	<i>Quantité de chaleur émise ou absorbée par unité de volume</i>
8	E	Volt /Mètre V/m	<i>Champ électrique</i>
9	K	Watt/ MètreDegré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique</i>
10	I	Ampère (A)	<i>Courant dans le sous-circuit électrique</i>
11	I _{PV}	Ampère (A)	<i>Courant photovoltaïque</i>
12	I _{TE}	Ampère (A)	<i>Courant thermoélectrique</i>
13	I _{PVTE}	Ampère (A)	<i>Courant photovoltaïque – thermoélectrique</i>
14	I _n	Ampère (A)	<i>Courant dû à la branche de type n</i>
15	I _p	Ampère (A)	<i>Courant dû à la branche de type p</i>
16	\vec{j}	Ampère /Mètre ² A.m ⁻²	<i>Flux de charge densité surfacique de courant</i>
17	K	Watt/mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique</i>
18	K _m	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique</i>
19	N, Nb	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'éléments</i>
20	N_max	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'élément maximal</i>
21	N_min	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'élément minimal</i>
22	P	Watt (W)	<i>L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique</i>

23	P_{PV}	Watt (W)	<i>Puissance photovoltaïque</i>
24	P_{TE}	Watt (W)	<i>Puissance thermoélectrique</i>
25	P_{PVTE}	Watt (W)	<i>Puissance photovoltaïque – thermoélectrique</i>
26	Q	Watt (W)	<i>L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique</i>
27	q_0	Watt (W)	<i>Flux de chaleur</i>
28	q	Watt (W)	<i>Flux de la chaleur à t=0</i>
29	r	Ohm (Ω)	<i>Résistance électrique des branches</i>
30	R	Ohm (Ω)	<i>Résistance électrique</i>
31	Re	Ohm (Ω)	<i>Résistance électrique</i>
32	R_max	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique maximal</i>
33	R_min	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique minimal</i>
34	R _{th}	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique</i>
35	S	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck</i>
36	S _n	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck de la branche n</i>
37	S _p	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck de la branche p</i>
38	t	Seconde (s)	<i>Temps</i>
39	T	Degré Kelvin (°K)	<i>Température</i>
40	T _s	Seconde (s)	<i>Temps de la simulation</i>
41	T _a	Degré Kelvin (°K)	<i>Température ambiante</i>
42	T _B	Degré Kelvin (°K)	<i>Température au point B</i>
43	T _C	Degré Kelvin (°K)	<i>Température au point C</i>
44	T _c	Degré Kelvin (°K)	<i>Température côté chaud</i>
45	T _f	Degré Kelvin (°K)	<i>Température côté froid</i>
46	U	Volt (V)	<i>Tension</i>
47	\vec{u}_{AB}	1 (sans dimension)	<i>Vecteur unitaire</i>
48	V _g	Volt (V)	<i>Tension créé par le générateur</i>

49	V_g	Volt (V)	<i>Tension créé par le générateur</i>
50	x	Mètre (m)	<i>Longueur</i>
51	ZT	1 (sans dimension)	<i>Facteur de mérite</i>
52	α	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck</i>
53	β	Degré /Kelvin (V. °K ⁻¹)	<i>Coefficient de Thomson</i>
54	ϵ_c	1 (sans dimension)	<i>coefficient de performance de Carnot</i>
55	σ	1/ (Ohm.Mètre) ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)	<i>Conductivité électrique</i>
56	ρ	Ohm.Mètre ($\Omega.m$)	<i>Résistivité électrique</i>
57	Π	Volt (V)	<i>Coefficient de Peltier</i>
58	σ	1/ (Ohm.Mètre) ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)	<i>Conductivité électrique</i>
59	λ	Watt/ MètreDegré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique</i>
60	λ_p	Watt/ MètreDegré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique des phonons</i>
61	λ_e	Watt/ MètreDegré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique des électrons</i>
62	Φ	%	<i>Rendement de la thermoréfrigération</i>
63	η	%	<i>Rendement de la thermogénération</i>
64	η_{TE}	%	<i>Puissance thermoélectrique</i>
65	η_{PV}	%	<i>Rendement photovoltaïque</i>
66	η_{PVTE}	%	<i>Rendement photovoltaïque - thermoélectrique</i>
67	η_r	%	<i>Rendement d'un générateur</i>

✓ ∂ : dérivée partielle

✓ ∇ : nabra = $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$

✓ Δ : laplacien = $d\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<u>CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Historique de la thermoélectricité.....	5
I.3 Historique des matériaux thermoélectriques.....	7
I.4 Applications.....	7
I.4.1 Production d'électricité en milieu extrême.....	8
I.4.1.1 Secteur spatial.....	9
I.4.1.2 Sites isolés.....	13
I.4.2 Générateur thermoélectrique utilisant de la chaleur perdue.....	14
I.4.3 Application aux milieux décentralisés.....	17
I.4.4 Micro production pour capteurs et micro-électronique.....	17
I.4.5 Solaire thermoélectrique.....	20
 Bibliographie:	 21
 <u>CHAPITRE II: MATERIAUX THERMOELECTRIQUES</u>	
II.1 Introduction.....	24
II.2 Propriétés thermiques et thermoélectriques.....	24
II.2.1 La conductivité électrique σ	24
II.2.2 La conductivité thermique λ.....	25
II.2.3 Le coefficient Seebeck S.....	25
II.2.4 Le coefficient de Peltier d'un matériau Π.....	25
II.2.5 Le coefficient de Thomson β.....	26
II.2.6 Relations de Kelvin.....	26
II.2.6.1.La première relation.....	27
II.2.6.2 La seconde relation.....	27
II.3 Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques.....	27
II.4 Matériaux conventionnels et nouvelles orientations.....	31
II.4.1 Matériaux conventionnels.....	31
II.4.2 Nouveau matériaux.....	33
II.5 Effet Thermoélectriques.....	34
II.5.1 Effet Seebeck.....	34
II.5.2 Effet Peltier.....	36
II.5.3 Effet Thompson.....	37
II.5.4 Effet Joule.....	38
II.6 Conversions thermoélectriques actuelles.....	39
II.6.1 Générateur thermoélectrique.....	39
II.6.1.1 Rendement de la thermo génération.....	40
II.6.2 Refroidisseur thermoélectrique.....	42
II.6.2.1 Rendement de la thermo réfrigératio.....	42
II.6.2.2 Exemple de la réfrigération.....	43
II.6.2.2.1 Module hybride thermoélectrique-photovoltaïque.....	43
 Bibliographie:	 46

<u>CHAPITRE III:MODELISATION D'UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE</u>	
III.1	Introduction.....50
III.2	Phénomènes physiques.....50
III.3	Les paramètres et les caractéristiques d'un générateur thermoélectrique.....53
III.3.1	Facteur de mérite.....53
III.3.2	Rendement de conversion.....54
III.3.3	Tension de Seebeck.....55
III.3.4	Puissance électrique.....55
III.4	Modèle électrique.....56
A	Ports thermiques.....56
B	Port électrique.....58
C	Modèle complet.....59
III.5	Modélisation et dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique.....59
III.5.1	Présentation de la méthode: Le modèle des éléments finis.....59
III.5.2	Explication du phénomène Étude thermique.....60
Les conditions aux limites thermiques:61
III.5.3	Étude thermoélectrique avec le modèle des éléments finis.....65
	Bibliographie:.....78

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1	Simulation de notre générateurs par le modèle de des éléments finis par le Matlab....80
IV.2	Effets étudiés.....80
IV.3	Les courbes de la modélisation.....81
IV.3.1	Pour les anciens matériaux.....81
IV.3.1.1	Effet Seebeck.....81
•	La courbe de tension en fonction de la variation de température : $V=f(\Delta T)$81
IV.3.1.2	Effet Peltier.....82
•	La caractéristique du courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$82
•	La caractéristique de la puissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$83
IV.3.1.3	Relations de Kelvin/Thomson :84
•	La courbe de la variation du facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$84
•	La courbe de la variation du rendement par l'effet Seebeck en fonction de la variation de température : $\text{rendement}=f(\Delta T)$85
IV.3.2	pour un nouveau matériau 'BiCuSeO'86
IV.3.2.1	Effet Seebeck.....86
•	La courbe de tension en fonction de la variation de température : $V=f(\Delta T)$86
IV.3.2.2	Effet Peltier.....87

• La caractéristique du courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$	87
• La caractéristique de la puissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$	88
IV.3.2.3 Relations de Kelvin/Thomson :	89
• La courbe de la variation du facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$	89
• La courbe de la variation du rendement par l'effet Seebeck en fonction de la variation de température : $\text{rendement}=f(\Delta T)$	90
IV.3.3 Comparaison entre la théorie et la modélisation.....	91
IV.4. Conclusion.....	92
CONCLUSION GENERALE.....	94

Liste des figures et des tableaux

<u>CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	5
Figure I.1. Photo d'une pastille de combustible et schéma de son environnement.....	9
Figure I.1 RTG utilisé lors de la mission Apollo 14.....	12
Figure I.2 RTG de Cassini avant montage.....	12
Figure I.3 RTG du rover Curiosity pour mission sur Mars.....	12
Figure I.4 Générateur thermoélectrique à Radioisotope pour application terrestre.....	14
Figure I.5 GTE à gaz.....	14
Figure I.6 Chevrolet Suburban équipé d'un GTE.....	16
Figure I.7 Schéma de principe d'un capteur auto-alimenté par un GTE.....	18
Figure I.8 Photographie, dimensions et caractéristique du module MPGD751-Micropelt....	19
Figure I.9 Sonde de pression différentielle autonome.....	19
Tableau I.1 Différents RTG embarqués lors de missions spatiales.....	11
<u>CHAPITRE II: MATERIAUX THERMOELECTRIQUES</u>	28
Figure II.1 Histogramme de ZT à température ambiante.....	28
Figure II.2. Conductivité électrique σ , coefficient Seebeck S, conductivité thermique λ et le facteur de puissance $S^2\sigma$ en fonction de la concentration des porteurs de charge.....	29
Figure II.3 Évolution de ZT en fonction de la température pour les matériaux conventionnels de type n et type p.....	32
Figure II.4 (a) Effet Seebeck au sein d'un matériau homogène, (b) Effet Seebeck au sein d'un couple formé de deux matériaux semi-conducteurs p et n.....	35
Figure II.5. Illustration de l'effet Peltier.....	36
Figure II.5 Illustration de l'effet Thomson.....	37
Figure II.6. (a) Schéma de principe d'une branche thermoélectrique, (b) d'un thermocouple, (c) et d'un module thermoélectrique.....	40
Figure II.7 Rendement thermoélectrique en fonction de la variation de température paramétrée par le facteur de mérite.....	41
Figure II.8(a) Schéma de principe d'un thermocouple thermoélectrique, (b) module thermoélectrique, et (c) convertisseurs complets composés des plusieurs modules.....	42
Figure II.9. schéma d'un module hybride photovoltaïque-thermoélectrique.....	44
Tableau II.1. Valeurs des grandeurs thermoélectriques, à température ambiante pour: isolants, semi-conducteurs et métaux.....	30

CHAPITRE III:MODELISATION D'UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE

Figure III.1 Le schéma d'un module thermoélectrique.....51
Figure III.2 Définition du courant et de chaleur s'écoule dans un bar homogène.....52
Figure III.3 Évolution du facteur ZT du composé Mo_3Sb_7 à haute température.....54
Figure III.4.Évolution du rendement de conversion en fonction du coefficient de mérite (ZT)54
Figure III.5.Évolution de la tension Seebeck en fonction de la variation de température.....55
Figure III.6 Évolution de la puissance récupérée en fonction de la variation de température.....56
Figure III.7 Trois modèles de port pour un élément de thermoélectrique.....56
Figure III.8 Modèle thermique proposé.....57
Figure III.9 Modèle équivalent pour le circuit thermique.....57
Figure III.10.Circuit thermique avec la capacité thermique du côté froid : C_c et le côté chaud : C_h58
Figure III.11.Modèle électrique.....58
Figure III.12 Modèle finale de système.....59
Figure III.13 Sous-domaines avec ses équations.....60
Figure III.14 Nœuds en sous-domaine I et III.....64
Figure III.15.Coté de A.....63
Figure III.16 La limite de B et C.....64
Figure III.17 Sous-domaines II avec ses équations.....65
Figure III.18 Circuit électrique équivalent.....67
Figure III.19.Circuit thermoélectrique équivalent.....67
Tableau III.1 Les analogies entre les variables électriques et thermiques.....57

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION

Figure IV.1.Tension en fonction de la variation de température: $V=f(\Delta T)$81
Figure IV.2.Courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$ 82
Figure IV.3.Puissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$ 83
Figure IV.4.Facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$84
Figure IV.5.Variation du rendement en fonction de la variation de température : $rendement=f(\Delta T)$ 85
Figure IV.6.Tension en fonction de la variation de température: $V=f(\Delta T)$86
Figure IV.7.Courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$ 87
Figure IV.8.Puissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$ 88
Figure IV.9.Facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$89
Figure IV.10.Variation du rendement en fonction de la variation de température : $rendement=f(\Delta T)$ 10
Tableau IV 1.Comparaison entre la théorie et la modélisation.....91

Introduction

Générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique, la biomasse et la thermoélectricité peuvent jouer un rôle clé dans la réalisation de deux objectifs majeurs : la sécurité énergétique et le réchauffement climatique. En effet, ces énergies sont inépuisables et produisent moins d'émissions de gaz à effet de serre que les énergies fossiles.

Depuis les crises énergétiques des années 1970, plusieurs pays industriels ont lancé des programmes visant à mettre en œuvre des solutions d'énergies renouvelables, mais le bas prix du pétrole à l'époque a empêché les énergies renouvelables de se développer réellement. . Depuis lors, la hausse du prix du pétrole, ainsi que la possibilité de voir apparaître une taxe carbone européenne, ont mis les politiques de développement des énergies renouvelables à l'ordre du jour.

Concernant le premier, il convient de noter qu'en 2006, le prix du pétrole était d'environ 75 USD, cinq fois plus qu'en 2001; les prix ont même recommencé à augmenter en 2007, atteignant le record historique de 80 USD sur le marché américain en septembre 2007. Concernant la taxe carbone, elle vise à préparer notre société à un épuisement progressif et inévitable des ressources fossiles, et à réduire les émissions de CO₂ les émissions de gaz à effet de serre, pour limiter les catastrophes promises par le réchauffement climatique.

Actuellement, les énergies renouvelables fournissent 13,1% de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire et 17,9% de la production mondiale d'électricité, selon l'Agence internationale de l'énergie. Les perspectives énergétiques mondiales prévoient que la part des énergies renouvelables dans la consommation mondiale d'énergie restera très stable à 14% en 2030, et qu'elle devrait atteindre environ 25% de la production d'électricité.

Dans l'industrie automobile, par exemple, plus de 60% du pétrole est consommé sous forme de perte de chaleur. Les constructeurs automobiles se lancent désormais dans de grands projets avec des objectifs clairement annoncés d'une réduction de 10% de la consommation de pétrole remplacée par une récupération d'énergie thermoélectrique, dans les cinq prochaines années.

Introduction générale

A plus petite dimension, la récupération d'énergie thermoélectrique pour l'alimentation des composants électriques (capteurs autonomes, ventilateurs de refroidissement des processeurs, micro batteries, etc.) se développe considérablement: là encore, de grands projets se développent dans le monde de l'informatique avec l'objectif de rendements énergétiques minimaux, dans ce cas, la miniaturisation des modules thermoélectriques est essentielle.

La recherche de nouvelles sources d'énergie non polluantes est devenue un enjeu majeur pour nos sociétés. C'est pourquoi la production d'électricité à partir de chaleur perdue au moyen de modules thermoélectriques (application de l'effet Seebeck) apparaît à ce jour comme une voie très prometteuse. Par ailleurs, des matériaux thermoélectriques peuvent être utilisés pour dissiper la chaleur par effet Peltier, notamment pour refroidir des composants de la microélectronique.

L'intérêt de la thermoélectricité est de fournir une conversion directe chaleur-électricité, sans secours auxiliaire (mécanique, électrique, chimique, etc.). Cependant, l'efficacité actuelle des dispositifs thermoélectriques, que ce soit dans la production d'électricité ou dans la réfrigération, est encore trop faible (moins de 10%), ce qui limite actuellement leur utilisation aux applications où la fiabilité et la durabilité sont plus importantes que le coût et le retour.

La thermoélectricité, ou conversion d'énergie à partir de la chaleur, est l'une de ces nouvelles sources d'énergie renouvelable. L'un des piliers des temps modernes est la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique. Des millions de tonnes d'énergie fossile sont sacrifiées chaque jour à l'électricité féérique pour notre confort. Cependant, une grande partie de cette énergie est perdue dans l'atmosphère sous forme de chaleur dans les centrales électriques, qui ne peut pas être exploitée efficacement.

Les progrès des transports ont considérablement augmenté. Aujourd'hui, le consommateur est aussi un nomade qui veut prendre son confort avec lui, créant de nouveaux besoins en sources d'énergie électrique. Ces besoins sont actuellement satisfaits au prix de la pollution de notre environnement par les métaux lourds contenus dans les batteries.

Introduction générale

La conversion thermoélectrique ouvre une nouvelle voie à la demande croissante d'une source d'énergie électrique. La conversion thermoélectrique n'utilise pas de systèmes mécaniques, aussi complexes que fragiles et coûteux à entretenir.

Elle est non polluante contrairement aux batteries car les générateurs thermoélectriques ont une durée de vie quasiment illimitée.

Bien que les performances des dispositifs thermoélectriques soient généralement médiocres, ils sont irremplaçables pour certaines applications telles que la production d'énergie électrique pour des sondes spatiales éloignées (utilisation de modules thermoélectriques). Du point de vue des applications à plus grande échelle, ils sont utiles pour la climatisation ou la réfrigération.

La conversion thermoélectrique a déjà fait ses preuves, notamment en tant que production d'énergie électrique pour des sondes spatiales lointaines. Outre cet aspect de la fourniture d'électricité, les matériaux thermoélectriques sont utilisés pour la réfrigération (effet Peltier) avec de nombreuses applications dans le domaine de l'électronique. Bien qu'elle ait été découverte il y a plus d'un siècle, la conversion thermoélectrique n'a pas encore atteint le stade d'application à grande échelle en raison de l'efficacité limitée des générateurs thermoélectriques d'où notre intérêt à la conversion thermoélectrique par un générateur thermoélectrique.

Dans le premier chapitre nous présentons un état de l'art de la thermoélectricité, ainsi que l'historique des matériaux thermoélectriques et leur application dans la conversion thermoélectriques.

Le deuxième chapitre est consacré au domaine des matériaux thermoélectriques. Nous présentons en premier les propriétés physiques et chimiques de ces dérivées ; la conductivité électrique et la conductivité thermique, aussi que tous les propriétés des matériaux, tout en présentant les conversions thermoélectriques actuelles.

Introduction générale

Les deux derniers chapitres sont consacrés au générateur thermoélectrique. Dans le troisième chapitre nous présentons l'architecture d'un générateur thermoélectrique, ses paramètres et ses caractéristiques, sans oublier les modes de fonctionnement de ce dernier, ainsi que les différentes équations. A partir de ces différentes équations nous nous sommes intéressé à la modélisation et au dimensionnement du générateur thermoélectrique par Matlab en utilisant le modèle des éléments finis. Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats de la simulation pour les différents effets étudiés : Effet Seebeck, Effet Peltier et les relations de Kelvin/Thomson.

On termine notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

L'effet thermoélectrique est un phénomène physique caractéristique de certains matériaux contribuant à la conversion de l'énergie. Ce matériau permet de transformer directement de la chaleur en électricité (génération d'électricité) ou de déplacer des calories par l'application d'un courant électrique (application de réfrigération).

Dans ce chapitre nous proposerons une présentation générale sur l'historique de la thermoélectricité et les matériaux thermoélectriques ainsi que certaines applications de la conversion thermique.

I.2 Historique de la thermoélectricité

La thermoélectricité a été découverte il y a presque deux siècles. Un bref résumé des développements historiques de cette dernière est présenté ci-dessous :

1821: Le physicien allemand Thomas Johann Seebeck découvre le premier effet thermoélectrique. Il a remarqué qu'une aiguille métallique est déviée dès qu'elle est placée entre 2 conducteurs de nature différente relié à leur extrémité par des jonctions et que l'une des jonctions est maintenue à une température plus élevée que l'autre [1].

1834: Le physicien Français Jean Peltier découvre le second effet thermoélectrique, qui est en fait le phénomène inverse de l'effet Seebeck soit : si l'on applique un courant à un solide métallique on observe un déplacement de chaleur d'une face à l'autre. Là aussi les explications que fournit Peltier se trouvent incorrectes.

1838: Heinrich Lenz explique les découvertes de Peltier. Si l'on fait passer un courant électrique dans un circuit conçu avec 2 matériaux différents et dont les raccords sont à la même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre. Cette démonstration fut effectuée à l'aide du couple thermoélectrique antimoine/bismuth.

La jonction de ces 2 fils métalliques est placée dans une goutte d'eau : quand le courant passe dans un sens la goutte d'eau gèle, quand le courant passe dans l'autre sens, la glace fond [2].

1851: William Thomson (lord Kelvin) soulage les effets Seebeck et Peltier. Un matériau, soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique, échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Inversement un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.

1865: Robert Bunsen et Joseph Stefan montrent que les semi-conducteurs donnent également naissance à l'effet Seebeck avec un rendement très supérieurs à ceux obtenus avec les métaux.

1909: Le scientifique Allemand Edmund Altenkirch effectue pour la première fois un calcul satisfaisant des propriétés des circuits thermoélectriques.

1949: Abram Ioffe a proposé que des matériaux semi-conducteurs dopés soient les meilleurs candidats pour être des matériaux thermoélectriques.

1954: Julien Goldsmid a été le premier à identifier le Tellure de Bismuth comme matériau pour la réfrigération thermoélectrique et a montré que des refroidisseurs thermoélectriques pouvaient atteindre zéro degré Celsius.

1990: Regain d'intérêt pour la thermoélectricité pour faire face aux préoccupations environnementales.

1995: Glenn Slack a introduit des nouveaux critères de sélection d'un bon matériau thermoélectrique et a développé la notion de «Phonon Glass Electron Crystal». Ce matériau devait posséder les propriétés électriques d'un Crystal et thermiques d'un verre [3].

I.3 Historique des matériaux thermoélectriques

Au début des années 1990, l'espoir renaît avec les travaux théoriques de Hicks et Dresselhaus qui proposent d'utiliser des matériaux présentant des structures de basse dimensionnalité. Selon leurs calculs, l'utilisation de Tellure de Bismuth (Bi_2Te_3) avec une structure de type multi-puits quantiques permettrait de multiplier d'avoir de meilleurs rendements que le Bi_2Te_3 massif.

De même, pour des fils quantiques à base de Bi_2Te_3 . De telles prédictions à l'époque même où les nanotechnologies explosent ont donc provoqué un regain d'intérêt pour la recherche en thermoélectricité. Cependant, il faut attendre le début des années 2000 pour voir apparaître les premiers matériaux thermoélectriques nanostructurés, présentant des ZT dépassant la limite empirique de 1,4 [4].

En 2008, Poudel et Al [5] proposent de réaliser des d'alliages massifs de BiSbTe constitués d'une multitude de grains nanométriques.

De nos jours, la recherche dans ce domaine se concentre autour d'une optimisation des paramètres de ces derniers, qui a pris toute son ampleur depuis le début des années 2000 avec le développement fulgurant des nanotechnologies.

La nano-structuration permet effectivement de moduler les propriétés des matériaux indépendamment les unes des autres et apporte donc, en ce sens, un renouveau dans le domaine de recherche de la thermoélectricité a vu le jour [6].

I.4 Applications

Le concept de générateur thermoélectrique venant d'être expliqué précédemment, nous sommes maintenant en mesure de présenter les applications où il peut être utilisé. Les secteurs concernés par la génération thermoélectriques sont nombreux mais le niveau de maturité de cette technologie reste très hétérogène dans l'ensemble des secteurs.

En effet certains domaines utilisent les générateur thermoélectrique électrique (GTE) depuis plusieurs dizaines d'années alors que d'autres, poussés par des motivations environnementales ou d'efficacité énergétique commencent tout juste à mettre en service leurs prototypes. De plus chaque secteur ayant des spécificités et des contraintes qui lui sont propres, nous avons décidé de classer les GTE en six catégories différentes définies comme suit[7]:

I.4.1 Production d'électricité en milieu extrême

Les applications présentées dans cette partie ont une source d'énergie thermique directement dédiée à être convertie en électricité. Le cahier des charges pour la génération électrique dans ces milieux est le suivant :

- ✦ La production électrique doit être très fiable et avoir une durée de vie importante;
- ✦ Le système de génération électrique doit fonctionner dans des conditions climatiques extrêmes, par exemple chaleur ou froid importants ou encore environnements secs ou à fort taux d'humidité;
- ✦ La maintenance doit être réduite au minimum car les coûts d'acheminement et de dépannage dans ces milieux sont très importants;
- ✦ Le système doit pouvoir fonctionner dans le vide (applications spatiales par exemple);
- ✦ Le système doit être résistant aux vibrations et aux radiations.
- ✦ Lorsque tous ces éléments sont pris en compte, on constate que le coût du Watt n'est plus essentiel et que c'est bien la fiabilité et la durée de vie du système dans un environnement extrême qui comptent le plus. On peut scinder l'utilisation de ces générateurs en deux familles, l'exploration spatiale et les applications terrestres [8].

I.4.1.1 Secteur spatial

Secteur historique des générateurs thermoélectriques, l'exploration spatiale a permis aux générateurs thermoélectriques de se développer rapidement. Le système de production électrique est appelé générateur thermoélectrique à radio-isotopes (RTG). Il est composé d'un générateur thermoélectrique complété par un générateur thermique à source nucléaire.

Il ne s'agit ni de fusion, ni de fission nucléaires qui exigeraient des contraintes importantes sur le système mais de la désintégration naturelle d'un atome radioactif. En se désintégrant, les atomes radioactifs libèrent de la chaleur dont une partie est directement convertie en électricité.

Le noyau radioactif utilisé est le plutonium 238 qui en se désintégrant naturellement libère de la chaleur. Le schéma suivant montre la pastille de plutonium et l'environnement du GTE Figure 1-I.

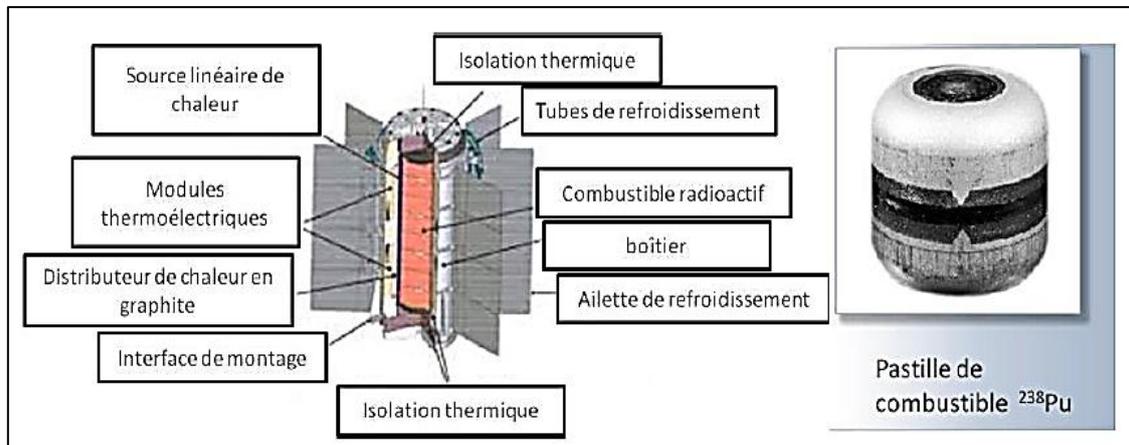


Figure I.1 : Photo d'une pastille de combustible et schéma de son environnement [9].

Historiquement, ce sont ces types de générateurs qui ont été les premiers générateurs thermoélectriques à se développer, le premier datant de 1961 avec des modules thermoélectriques au PbTe pour le satellite de navigation Transit de l'U.S. Navy. Ce générateur a fourni environ 2,7 W pendant plus de 15 ans.

Pour ces applications, on souhaite avant tout garantir une alimentation électrique stable sur une période la plus longue possible, typiquement 14 ans. Le rapport énergie/poids doit être élevé car le moindre kilo supplémentaire se paye très cher.

De plus, la taille des modules thermoélectriques est facilement ajustable et ils possèdent une caractéristique tension/courant linéaire ce qui rend leur contrôle plus simple. Le principal intérêt de cette technologie comparativement au solaire photovoltaïque est son indépendance aux conditions extérieures.

En effet au fur et à mesure que l'on s'éloigne du soleil le flux solaire diminue, de 1373 W/m² en moyenne au niveau de la Terre à 1 W/m² au niveau de Pluton. De plus dans le cas des panneaux solaires, le dispositif de conversion d'énergie se situe à l'extérieur du système à alimenter et est donc plus vulnérable.

Le retour d'expérience de ces dispositifs est également très positif avec des temps de fonctionnement bien supérieurs à ceux pour lesquels ils ont été conçus. Ce qui explique leur utilisation avec succès pour 28 missions spatiales depuis 1961 [10].

Le Tableau suivant inventaire des différents RTG (générateur thermoélectrique électrique) embarqués lors de missions spatiales:

Générateur Thermoélectrique à Radioisotope RTG	Puissance électrique au début de la mission par RTG	Nombre de RTG	Mission	Année	Durée de vie prévue	Durée de vie
Space Nuclear Auxiliary Power SNAP-3 PbTe	2.7 W	1	Transit	1961		15 années
SNAP-19B RTG PbTe-Tags	28.2 W	2	Nimbus	1969		
SNAP-19B RTG PbTe-Tags	42.6 W	2	Viking 1	1975	90 jours	6 années
		2	Viking 2	1975	90 jours	6 années
	40.3 W	4	Pioneer 10	1972	5 années	30 années
		4	Pioneer 11	1973	5 années	22 années
SNAP-27 RTG PbSnTe	70 W		Apollo 12, 14, 15, 16, 17	1969-72	2 années	5-8 années
Multi-Hundred Watt (MHW) RTG SiGe	158 W	3	Voyager 1 & 2	1977		Encore en fonctionnement après 30 années
General Purpose Heat Source (GPHS) RTG SiGe	292 W	2	Galileo	1989		14 années
		3	Cassini	1997		Encore en fonctionnement après 14 années
		1	Ulysses	1990		21 années
		1	New Horizons	2006		Encore en fonctionnement après 6 années
Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator MMRTG PbTe-Tags	110 W	1	Curiosity	2011		Prévu pour 14 années

Tableau I.1 : Différents RTG embarqués lors de missions spatiales [11].

Les photographies suivantes présentent trois de ces générateurs, successivement sur la Lune (Figure I.2), avant son montage sur Cassini (Figure I.3) et sur le rover Curiosity (Figure I.4).



Figure I.1 : RTG utilisé lors de la mission Apollo 14 [12].

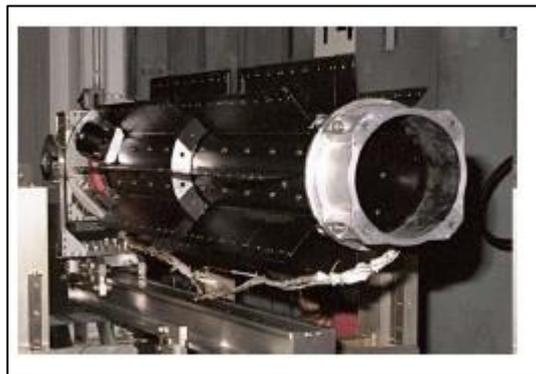


Figure I.2 : RTG de Cassini avant montage [13].



Figure I.3: RTG du rover Curiosity pour mission sur Mars [14].

Trois technologies de modules thermoélectriques se partagent l'ensemble de ces missions, les modules PbTe-TAGS, PbSnTe et SiGe. Le choix des matériaux se faisant essentiellement sur la température de fonctionnement du système.

Les modules thermoélectriques composés de Telluride sont les plus efficaces lorsqu'ils travaillent entre la température ambiante et 600 °C. Les modules à base de SiGe ont été développés pour augmenter la puissance spécifique (rapport de la puissance électrique sur le poids total du système) et fonctionner à des températures allant jusqu'à 1000 °C et ayant un maximum pour la figure de mérite dans les températures élevées.

I.4.1.2 Sites isolés

Même si aujourd'hui l'utilisation des RTG dans les milieux isolés sur Terre n'est plus vraiment d'actualité, principalement à cause de la présence de matériaux radioactifs, elle a permis dans la seconde moitié du XXème siècle d'alimenter des phares et des balises de navigation de manière extrêmement fiable dans des zones reculées.

Pour la plupart, la source de chaleur était fournie par la désintégration du ^{90}Sr . Les zones concernées étaient essentiellement situées au Canada et dans l'ancienne URSS. Ces générateurs sont constitués d'un bouclier en acier renfermant le noyau radioactif avec des illettes à l'extérieur.

Il n'existe aujourd'hui que très peu de systèmes de ce type, la plupart ayant été démantelés. Néanmoins bon nombre de ces dispositifs sont à l'abandon et en cours de démantèlement pour éviter la prolifération des matériaux radioactifs.

De plus, un certain nombre n'ont pas été retrouvés ce qui pour l'agence internationale de l'énergie est considéré comme une préoccupation majeure. La Figure I-5 présente un générateur de ce type.



Figure I.4 : Générateur thermoélectrique à Radioisotope pour application terrestre [15].

Cette technologie a progressivement été remplacée par des générateurs thermoélectriques à gaz (Figure I.6) ou au fioul.



Figure I.5 : GTE à gaz [16].

Le principe est le même que pour les précédents générateurs, exceptée la source de chaleur qui n'est plus interne et radioactive mais qui provient de la combustion d'un gaz ou de fioul qu'il faut approvisionner par l'extérieur. Ces générateurs sont principalement utilisés sur les plateformes offshore, le long des pipelines, en altitude ou encore à côté des puits de gaz. Ils permettent d'alimenter des systèmes de communication, de supervision, d'acquisition ou encore des automatismes et des systèmes de sécurité.

I.4.2 Générateur thermoélectrique utilisant de la chaleur perdue

Les systèmes de conversion d'énergie a une efficacité inférieure à 100% et admet donc des pertes. Dans la plupart des cas, ces pertes sont de nature thermique et sont évacuées naturellement ou par un système dédié vers l'extérieur.

Le but de cette partie est d'identifier les zones où les pertes de chaleur sont importantes et où la thermoélectricité peut être compétitive.

Le secteur le plus actif pour cette récupération d'énergie est le secteur automobile où la concurrence pour des voitures toujours plus propres est très encouragée et très dynamique par les gouvernements.

Depuis 2009, l'Union européenne a établi des normes contraignantes pour les voitures neuves avec des émissions allant jusqu'à 130 g de CO₂ (5,2 l / 100 km) par km à partir de 2015 et 95 g de CO₂ / km (3,7 l / 100 km) à partir de 2020. Au-delà de ces seuils, les constructeurs automobiles doivent payer des amendes d'environ 20 € par gramme supplémentaire depuis 2012. Ces amendes augmenteront à partir de 2020 à 95 € par gramme.

En plus de ces normes, le prix des carburants continuera à augmenter à cause de la demande croissante des marchés émergents.

Ces deux derniers points obligent les constructeurs des marchés européens à innover de manière à satisfaire aux normes précédemment citées et à réduire la consommation de carburant. Plusieurs technologies sont étudiées, elles doivent répondre à un ou plusieurs des critères suivants [17]:

- ✦ Coût;
- ✦ Robustesse et durée de vie (15 ans);
- ✦ Adaptation, la technologie doit pouvoir s'adapter facilement sur toute la flotte de véhicules, d'une voiture particulière à un camion ou encore au type de carburant utilisé (gaz, diesel ou essence);
- ✦ Intégration, la technologie doit s'intégrer pleinement dans le système énergétique du véhicule;
- ✦ Autres avantages (améliorer le confort du conducteur, réduire le bruit dans l'habitacle,...).

L'utilisation d'un générateur thermoélectrique permettrait de compléter l'alternateur des véhicules conventionnels et ainsi de réduire ses dimensions.

L'évolution des prototypes automobiles équipés de générateurs thermoélectriques est très importante depuis ces 10 dernières années. Par exemple, le prototype de BMW est passé d'une production de 80 W avec des modules Bi_2Te_3 en 2003 à plus de 600 W avec des modules PbTe en 2011. Le gain de carburant serait alors de l'ordre de 1,2%. Les perspectives envisagées sont l'implantation du GTE sur le système de recirculation des gaz d'échappement.

Ce système, diminue l'oxyde d'azote produit mais pour fonctionner correctement, les gaz d'échappement doivent être refroidis. Pour cela, il est équipé d'un échangeur et d'une vanne qui permet de contrôler la température des gaz. L'intégration de module thermoélectrique ne nécessitera donc que peu de modifications et n'entraînera pas d'augmentation importante des coûts.

De son côté General Motors a équipé un Chevrolet Suburban d'un GTE (Figure I.7).



Figure I.6 : Chevrolet Suburban équipé d'un GTE [18].

Ce véhicule, plus lourd permet de limiter l'influence du poids supplémentaire apporté par l'ensemble du GTE. Les premiers prototypes étaient équipés de modules Bi_2Te_3 fonctionnant à des températures inférieures à 300 °C, et produisaient une puissance de 25W. Cette puissance relativement faible peut s'expliquer en partie par la limitation en température des modules Bi_2Te_3 qui obligeait un bridage de la température des gaz.

Le prototype suivant, équipé de skutterudites peut monter plus haut en température, environ 500 °C et une puissance de 230 W est attendue. Une perspective d'amélioration des contacts thermiques et électriques couplée à une augmentation des performances des matériaux pourrait permettre à ce prototype d'atteindre une puissance supérieure à 400 W.

I.4.3 Application aux milieux décentralisés

De nos jours, disposer de l'énergie électrique est pratiquement indispensable pour faire fonctionner la plupart des équipements domestiques. Néanmoins, il existe de nombreux endroits qui n'ont pas accès au réseau électrique, soit parce que la population n'a pas un niveau de revenus qui lui permet de consommer suffisamment pour être reliée à un réseau, soit parce que la connexion au réseau n'est pas la solution économique la plus intéressante. On peut donc scinder la production d'électricité décentralisée en 2 catégories, l'une qui concerne les pays en développement et l'autre, les pays développés.

I.4.4 Micro production pour capteurs et micro-électronique

Les progrès récents de la micro-électronique ont permis l'apparition et le développement très rapide de micro-actionneurs et de capteurs intelligents sans fils dans l'industrie. Aujourd'hui, ces dispositifs peuvent fonctionner avec seulement quelques centaines de milliwatts.

L'alimentation de tels dispositifs à partir du réseau électrique nécessite de prévoir à l'avance le passage de câbles et nécessite souvent une grande longueur de câbles alors que l'énergie à apporter est très faible. La tendance actuelle pour améliorer les installations industrielles consiste à rajouter de nouveaux capteurs qui vont permettre une régulation plus performante et fine du procédé. Pouvoir ajouter des capteurs, sans avoir de nouveaux passages de câbles à prévoir, devient alors un challenge très intéressant pour les fabricants d'instrumentation.

Les industriels recherchent donc des micros générateurs produisant quelques milliwatts pour alimenter et rendre autonomes ces micro-instruments. En milieu industriel, les sources de chaleur sont très nombreuses : canalisations de fluide chaud, fours, conduites de vapeur, moteurs, air conditionné, chauffage, roulements...

Les générateurs thermoélectriques sont donc un candidat de choix pour ce challenge. La faible maintenance et le bon comportement dans des ambiances difficiles sont alors des atouts importants pour les GTE [19].

Un schéma de principe est donné ci-dessous Figure I.8.

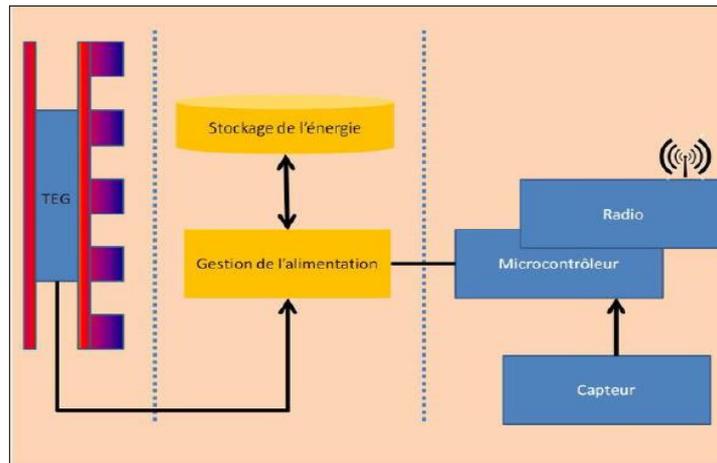


Figure I. 8 :Schéma de principe d'un capteur auto-alimenté par un GTE [20].

Ce type de dispositif peut se décomposer en trois parties:

- La production d'énergie électrique (à gauche);
- La gestion et le stockage de cette énergie (au centre); et
- L'acquisition et la communication (à droite).

Le cahier des charges impose de pouvoir réaliser un dispositif complet incluant les échangeurs thermiques, le module TE, un convertisseur DC/DC ayant un bon rendement et un minimum de stockage de l'énergie électrique.

La société Micropelt développe des dispositifs de ce type dont le module MPG-D751 est présenté dans la Figure I-9.

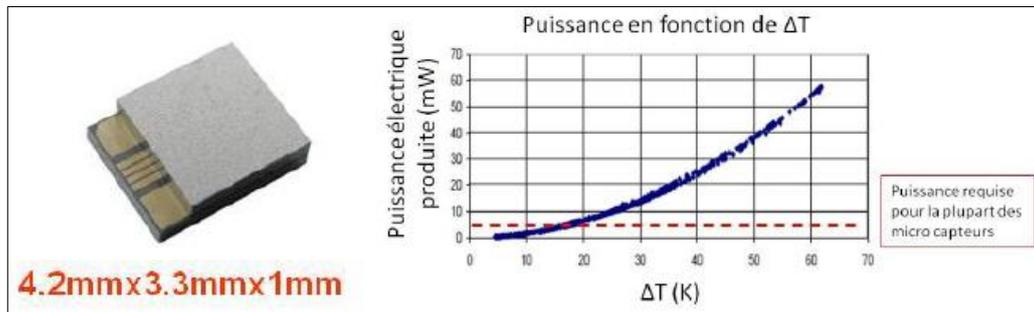


Figure I.7 : Photographie, dimensions et caractéristique du module MPG-D751 de Micropelt [21].

Ce module peut produire un minimum d'1 milliwatt pour une différence de température de 10 °C (1,5 mW au point de fonctionnement maximum MPP) et plus de 10 mW pour une différence de 30 °C (14 mW au MPP). Le nombre élevé de couples, 540, déposés sur le substrat en silicone permet d'obtenir des niveaux de tension élevés facilitant ensuite la régulation de tension.

En complétant ces modules avec des échangeurs chauds et froids ainsi qu'un convertisseur DC/DC et un condensateur de stockage, on peut ainsi réaliser un générateur prêt à l'emploi. Par exemple Micropelt a réalisé une sonde de température doigt de gant autoalimentée communiquant (TE-Power Probe) dédiée aux conduites chaudes (pipe harvester). Ils ont également développé en collaboration avec Emerson une sonde de pression différentielle autonome (Figure I-10) [22].



Figure I.8 : Sonde de pression différentielle autonome [23].

Une autre société nommée Nextreme développe aussi des produits du même type. De son côté, Samson et al. se sont penchés sur le secteur aéronautique en étudiant un GTE combiné avec des matériaux à changement de phase pour alimenter des capteurs sans fils dans les avions. Le matériau à changement de phase utilisé est l'eau [24].

I.4.5 Solaire thermoélectrique

Thermiquement, la source la plus abondante est sans nul doute le soleil, c'est pourquoi il apparaît naturel de l'envisager comme source de chaleur pour un GTE. Le principal problème de cette technologie est son flux thermique relativement faible (autour de 103W/m^2 en moyenne) qui oblige la mise en place d'un système de concentration de flux pour atteindre des rendements satisfaisant.

Par exemple, une concentration optique du rayonnement solaire (lentille) permet de focaliser la puissance thermique en un point particulier et ainsi atteindre des niveaux bien plus élevés. On peut également utiliser une concentration thermique du flux de chaleur en utilisant un collecteur de type ailettes.

Les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology ont montré que les S GTE (solarthermoelectricgenerators) peuvent fournir un rendement de l'ordre de 10% avec un facteur de concentration du soleil de l'ordre de 45 [25].

Bibliographie:

- [1] H.J. Goldsmid, R.W. Douglas, 'The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration', *British Journal of Applied Physics*, 1954, Vol.5, N°303, pp. 386-390.
- [2] F.D. Rosi, B. Abeles, R.V. Jensen, 'Materials for thermoelectric refrigeration', *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1959, Vol.10, pp. 191-200.
- [3] C.B. Satterthwaite, R.W. Ure, 'Electrical and thermal properties of Bi₂Te₃', *Physical Review*, 1957, Vol. 108, pp. 1164-1170.
- [4] D. Astrain, J.G. Vián, A. Martínez, and A. Rodríguez, 'Study of the influence of heat exchangers' thermal resistances on a thermoelectric generation system', *Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 602-610, 2010.
- [5] C.C. Wang, C.I. Hung, and W.H. Chen, 'Design of heat sink for improving the performance of thermoelectric generator using two-stage optimization,' *Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 236-245, 2012.
- [6] H. Julian Goldsmid, 'Theory of thermoelectric refrigeration and generation', in *Introduction to Thermoelectricity*, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 7-21.
- [7] R.L. Cataldo, and G.L. Bennett, U.S. Space Radioisotope Power Systems and Applications: Past, Present and Future, *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences*. 2011.
- [8] J.P. Fleurial, S. Bux, C.K. Huang, B.J. Cheng, T.Vo., P. von Allmen, T. Caillat, Y. Pei, A. Lalonde, A. Zevalkink, A. May, E. Toberer, G. Snyder, D. King, K. Star, J. Ma, R. Kaner, B. Dunn, and C.C.S. Kauzlarich, 'Advanced high temperature bulk thermoelectric materials', *Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space 2011*, A. nuclear society, Ed-2011.
- [9] Y. Rosenberg, Y. Gelbstein, and M.P. Dariel, 'Phase separation and thermoelectric properties of the Pb_{0.25}Sn_{0.25}Ge_{0.5}Te compound', *J. Alloys Compd.*, Vol. 526, pp. 31-38, 2012.
- [10] P.F.P. Poudeu, A. Guéguen, C.I. Wu, T. Hogan, and M.G. Kanatzidis, 'High Figure of Merit in Nanostructured n-Type KPbmSbTem⁺² Thermoelectric Materials', *Chem. Mater.*, Vol. 22, No. 3, pp. 1046-1053, Feb. 2010.
- [11] K. Biswas, J. He, Q. Zhang, G. Wang, C. Uher, V. P. Dravid, and M.G. Kanatzidis, 'Strained endotaxial nanostructures with high thermoelectric figure of merit', *Nat. Chem.*, Vol. 3, No. 2, pp. 160-166, 2011.

- [12] R. Alimov, 'Radioisotope Thermoelectric Generators - Bellona', [Online]. Available: <http://www.neazoi.com/technology/thermocouple/37598.htm>. [Accessed: 17-May-2014].
- [13] I.A.E. Agency, Identification of Radioactive Sources and Devices. Vienna: IAEA, 2009.
- [14] B. Mazar, 'State of the art prototype vehicle with a thermoelectric generator', presented at the Thermoelectrics Applications Workshop 2012, Munich, Germany, 2012.
- [15] D. Crane, 'Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles Gentherm Inc.', 05/17/13 available at http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/sites/default/files/ace080_crane_2013_o.pdf, 17-May-2013.
- [16] Renoter project,' in 2nd Thermoelectrics Applications Workshop 2011, 2011. [Online]. Available: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/proceedings/-2011_thermoelectrics_presentations.html.”.
- [17] L. Aixala, 'Renoter project,' in 3rd Thermoelectrics Applications Workshop 2012, 2012. [Online]. Available: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/proceedings/-2012_thermoelectrics_presentations.html..
- [18] A. Sizmann, H. Kuhn, J. Steinwandel, C. Peineke, A. Westenberger, and M. Schwarze, 'Prospects and Plans for the Introduction of Other Renewable Energy Sources for Aviation', SWAFEA formal report D.5.1, 2011.
- [19] T. Kousksou, J.P. Bédécarrats, D. Champier, P. Pignolet, and C. Brillet, 'Numerical study of thermoelectric power generation for an helicopter conical nozzle', *J. Power Sources*, Vol. 196, No. 8, pp. 4026-4032, 2011.
- [20] N. R. Kristiansen and H. K. Nielsen, 'Potential for usage of thermoelectric generators on ships', *J. Electron. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1746-1749, 2010.
- [21] G. Shu, Y. Liang, H. Wei, H. Tian, J. Zhao, and L. Liu, A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 19, pp. 385-401, 2013.
- [22] World Energy Outlook 2010 Edition. International Energy Agency Publications, France, 2010.
- [23] V. Leonov, R.J.M. Vullers, and C.V. Hoof, 'Thermoelectric generator hidden in a shirt with a fabric radiator', *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1449, No. 1, pp. 556-559, 2012.

[24] V. Leonov, T. Torfs, R. Vullers, and C. Van Hoof, 'Hybrid Thermoelectric-Photovoltaic Generators in Wireless Electroencephalography Diadem and Electrocardiography Shirt', *J. Electron. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1674-1680, 2010.

[25] M. Lossec, 'Systèmes multisources de récupération d'énergie dans l'environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement', École Normale Supérieure de Cachan, 2011.

Chapitre 2

MATERIAUX

THERMOELECTRIQUES

II.1 Introduction

Les matériaux thermoélectriques n'ont de bonnes propriétés thermoélectriques que sur des intervalles de température restreints. Dans les années 1950, des travaux expérimentaux ont montré que des semi-conducteurs massifs à base de Tellure de Bismuth alliés avec des composés tels l'Antimoine, l'Étain ou encore le Plomb pouvait être d'intéressants matériaux thermoélectriques. Des travaux ont fait émerger l'idée d'utiliser la thermoélectricité pour la récupération d'énergie et la réfrigération.

Les qualités des matériaux thermoélectriques sont mesurées par un nombre sans dimension, appelé facteur de mérite (ZT). Cependant, du fait d'une absence de progrès dans ce domaine jusqu'aux années 1970, il a été postulé qu'un facteur de mérite de 1 était une sorte de barrière d'efficacité thermoélectrique [1].

Dans ce chapitre nous présentons un aperçu sur les matériaux thermoélectriques. Nous commençons tout d'abord par les propriétés physiques et chimiques ; le facteur de mérite qui définit l'efficacité d'un matériau ainsi que les effets thermoélectriques et nous nous penchons ensuite sur les conversions thermoélectriques et ses paramètres thermoélectriques.

II.2 Propriétés thermiques et thermoélectriques

Elles sont caractérisées par des paramètres essentiels, qui sont :

II.2.1 La conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)

C'est l'opposé de la résistivité électrique (ρ). Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1 m de long et 1 m² de section. Parmi les meilleurs conducteurs, il existe des métaux (comme le cuivre ou l'aluminium) pour les porteurs de charges sont des «électrons libres».

Certains matériaux, tels que les semi-conducteurs, ont une conductivité qui dépend d'autres conditions physiques, telles que la température ou l'exposition à la lumière.

II.2.2 La conductivité thermique λ (W/m.K)

Il s'agit d'une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction, c'est la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre [2].

II.2.3 Le coefficient Seebeck S (V/K)

Une différence de température dT entre les jonctions de deux matériaux A et B provoque une différence de potentiel électrique dV selon l'équation suivante:

:

$$S_{AB} = \frac{dV}{dT} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- ✦ dT : la différence de la température (K).
- ✦ dV : la différence de tension (V).

Les coefficients Seebeck des deux matériaux sont reliés au coefficient Seebeck du couple selon l'équation :

$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (\text{II.2})$$

- ✦ S_A : coefficient Seebeck du matériau (A), (V/°K).
- ✦ S_B : coefficient Seebeck du matériau (B), (V/°K).

II.2.4 Le coefficient de Peltier d'un matériau Π (V)

Un courant électrique I est imposé sur un circuit composé de deux matériaux, ce qui implique un dégagement de chaleur Q à une jonction et une absorption de chaleur à l'autre jonction, selon l'équation suivante:

$$\Pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad (\text{II.3})$$

Avec:

- ✦ Q : la chaleur libéré ou absorbée (W).
- ✦ I: le courant électrique (A) [3].

II.2.5 Le coefficient de Thomson β (VK^{-1})

Le coefficient Thomson est défini directement pour un seul matériau. Lorsqu'un gradient de température et un courant électrique sont présents simultanément, il y a génération ou absorption de chaleur dans chaque segment de matériau pris individuellement.

Le gradient de flux thermique au sein du matériau se présente alors sous la forme suivante:

$$dQ_V = -\beta \times \frac{\partial T}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{j} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- ✦ dQ_V : la quantité de chaleur émise (positif) ou absorbée (négatif) par unité de volume du matériau (en W.m^{-3}).
- ✦ β : le coefficient de Thomson (en $\text{V.}^\circ\text{K}^{-1}$).
- ✦ T: la température au du matériau (en $^\circ\text{K}$).
- ✦ r: le point.
- ✦ le vecteur j : le flux de charge (en A.m^{-2}) [4].

II.2.6 Relations de Kelvin

Le physicien Lord Kelvin est également à l'origine des deux lois qui relient les 3 coefficients thermoélectriques entre eux. Ces trois coefficients sont effectivement interdépendants.

II.2.6.1 La première relation

La première relation fait un lien entre le coefficient Peltier et le coefficient Seebeck d'une jonction de deux matériaux conducteurs (A et B). Pour une jonction standard A/B, la première relation de Kelvin est:

$$S_{AB} = \frac{\Pi_{AB}}{T} \quad (\text{II. 5})$$

- ✦ S_{AB} : le coefficient Seebeck ($\text{V}/^\circ\text{K}$).
- ✦ T : la température absolue de la jonction p/n ($^\circ\text{K}$).
- ✦ Π_{AB} : le coefficient de Peltier d'un matériau (V).

II.2.6.2 La seconde relation

La seconde relation de Kelvin fait le lien entre les coefficients Seebeck et Thomson:

$$\frac{\partial S_{AB}}{\partial T} = \frac{\beta_A - \beta_B}{T} \quad (\text{II. 6})$$

Avec:

- ✦ S_{AB} : le coefficient Seebeck ($\text{V}/^\circ\text{K}$).
- ✦ T : la température absolue de la jonction p/n ($^\circ\text{K}$).
- ✦ β_A et β_B : les coefficients Thomson des matériaux A et B formant la jonction ($\text{V}/^\circ\text{K}$) [5].

II.3 Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques

Un nombre sans dimensions, appelé facteur de mérite ZT donné par la relation :

$$ZT = TS^2 \frac{\sigma}{\lambda} \quad (\text{II. 7})$$

Où :

- ✦ T : la température absolue ($^\circ\text{K}$).
- ✦ S : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck ($\text{V} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$).
- ✦ σ : la conductivité électrique ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).
- ✦ λ : la conductivité thermique ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}$).

La figure suivante montre l'évolution du facteur de mérite ZT au cours des cinq dernières décennies.

Les recherches actuelles se développent dans ce domaines afin d'augmenter le facteur de mérites pour que les systèmes thermoélectriques réalisent avec les systèmes de réfrigérateur actuelles [6].

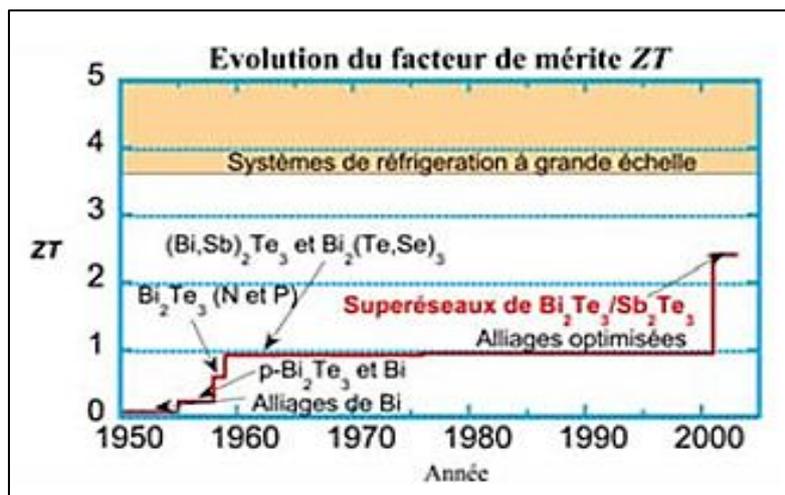


Figure II.1 : Histogramme de ZT à température ambiante [7].

▪ **Un bon matériau thermoélectrique :**

D'un point de vue qualitatif, un bon matériau thermoélectrique doit posséder:

- ✦ **Un bon coefficient Seebeck (S):** pour générer les effets attendus ;
- ✦ **Une bonne conductivité électrique (σ):** pour diminuer les pertes de chaleur par effet joule pour augmenter le courant qui traverse la charge; et
- ✦ **Une faible conductivité thermique (λ):** pour maintenir un gradient de température appréciable aux bornes du matériau.

Dans la définition du facteur de mérite ZT , les trois coefficients S , λ et σ interviennent, ils ne sont pas indépendants les uns des autres. La recherche des matériaux de grand facteur de mérite consiste donc à trouver des composés qui répondent simultanément aux trois coefficients. Toutefois, cette mission n'est pas simple puisque les propriétés déterminant le facteur de mérite sont mutuellement liées.

En effet, pour augmenter la conductivité électrique il faut augmenter la concentration des porteurs de charge, mais en général ceci a pour conséquence la diminution du coefficient Seebeck et l'augmentation de la conductivité thermique. Par conséquent, le facteur de mérite décroît ou n'augmente pas [8].

Cette influence des porteurs de charge sur les propriétés thermoélectriques est représentée sur la Figure II- 2 représente les variations de ses trois paramètres en fonction du logarithme de la concentration en porteurs de charge, pour trois groupes des matériaux : isolants, semi-conducteurs et métaux.

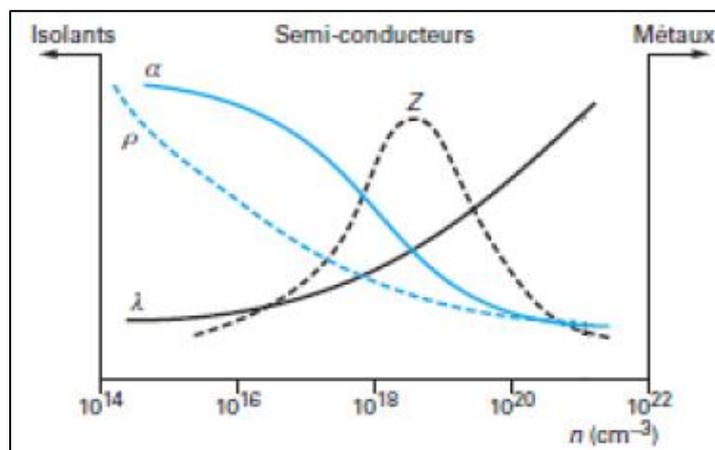


Figure II.2. Conductivité électrique σ , coefficient Seebeck S , conductivité thermique λ et le facteur de puissance $S^2\sigma$ en fonction de la concentration des porteurs de charge [9].

Selon la figure II.2, il s'ensuit que ni les isolants ni les métaux n'ont de facteurs de mérite appropriés car, pour les premiers, malgré leur excellent le coefficient Seebeck S , conductivité électrique σ , est très faible et la conductivité thermique λ est très élevée.

Les isolants, au contraire, ont de grands coefficients Seebeck et de faibles conductivités thermiques, mais cela ne suffit pas pour compenser leurs trop faibles conductivités électriques. Il est donc clair que seuls les semi-conducteurs peuvent atteindre de bons facteurs de mérite ZT. Par contre, pour les semi-conducteurs, il est possible de contrôler la concentration des porteurs de charges en ajustant la dose de dopage. Les meilleurs facteurs de mérite sont obtenus pour des concentrations de porteurs de charges de 10^{19} à 10^{21} cm^{-3} , ce qui correspond à des semi-conducteurs fortement dopés.

La capacité d'un matériau d'être dopé pour atteindre ces valeurs de concentration de charge, aussi bien pour les porteurs du type n, que du type p, est considérée comme un facteur important pour l'optimisation du facteur de mérite [10]. Le Tableau II.1 présente les valeurs des grandeurs thermoélectriques pour les trois types des matériaux : métaux, semi-conducteurs et isolants.

Grandeur			Matériaux		
Non	Symbole	Unité	Isolants	Semi-conducteurs	Métaux
<i>coefficient Seebeck</i>	S	$\mu\text{V}/^\circ\text{K}$	1000	200	5
<i>conductivité électrique</i>	σ	$\Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$	10^{-10}	10^5	10^8
<i>conductivité thermique</i>	λ	$\text{W}/(\text{m}.\text{K})$	0.1 - 1	1 - 100	10 - 100

Tableau II.1 : Valeurs des grandeurs thermoélectriques, à température ambiante pour : isolants, semi-conducteurs et métaux [11].

Ces grandeurs résultent des caractéristiques microscopiques du matériau, la conductivité électrique et le coefficient Seebeck sont corrélés au transport des porteurs de charge (trous ou électrons) dans le matériau, telle que la conductivité thermique est liée au transport de la chaleur à la propagation des phonons, mais également au transport des porteurs de charge.

Ainsi, le facteur de mérite est lié aux mécanismes de diffusion des porteurs de charge, ainsi qu'à la structure des bandes, à la dynamique du réseau (diffusion des phonons). La complexité de l'optimisation du facteur de mérite réside dans l'interdépendance entre les phonons et celui des transports des porteurs de charge.

En effet, la conductivité thermique est composée de deux contributions : d'une part, celle des électrons et, d'autre part celle des phonons:

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_e \quad (\text{II.8})$$

- ✦ λ_p : la conductivité thermique liée à la propagation des phonons : W/m.°K.
- ✦ λ_e : la partie résultant du transport des électrons : W/(m.°K).

II.4 Matériaux conventionnels et nouvelles orientations

II.4.1 Matériaux conventionnels

Un grand nombre des matériaux ont été étudiés, au cours du siècle dernier.

La famille des tellures de bismuth et de plomb, les alliages silicium-germanium, ainsi que les alliages bismuth-antimoine, constituent l'essentiel des matériaux de référence.

La figure II.3, montre que chacune de ces familles n'est efficace que sur un intervalle de température restreint.

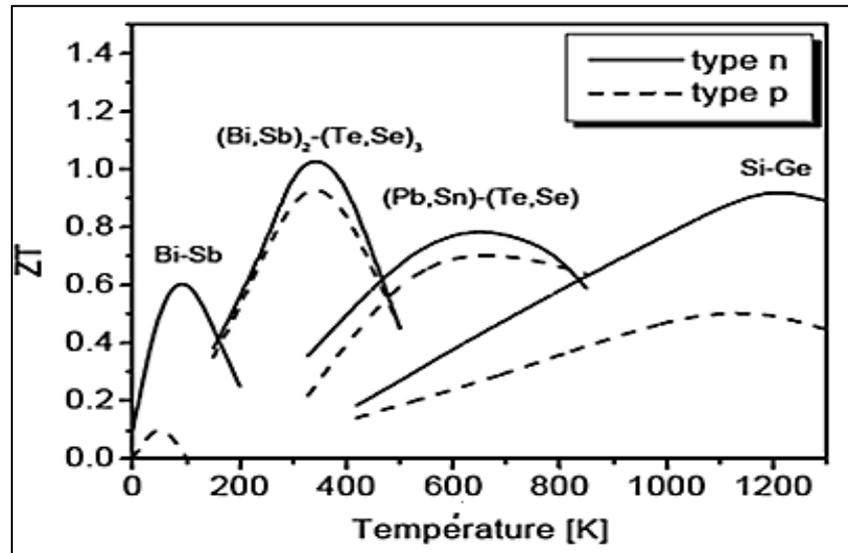


Figure II.3 : Le facteur de mérite (ZT) en fonction de la température pour les matériaux conventionnels de type n et type p [12].

Dans les basses températures, le matériau le plus utilisé en réfrigération thermoélectrique est à base de bismuth et de tellure Bi_2Te_3 .

Dans le domaine de températures 150-200 °K, un autre matériau thermoélectrique formé sur la base de Bismuth et Antimoine présente des propriétés thermoélectriques moyennes ($ZT = 0,6$), de type n.

Pour des températures entre 500-750 °K, le matériau le plus utilisé est le tellure de plomb et ses dérivés (Pb, Sn) Te.

Pour les hautes températures, les alliages à base germanium et de silicium possèdent des propriétés thermoélectriques au-dessus de 1000 °K et sont conçus pour des applications de génération d'électricité dans le domaine spatial, ces matériaux coûtent très cher [13].

II.4.2 Nouveau matériaux

A partir des années 1990, plusieurs matériaux thermoélectriques ont été développés :

- **Les chalcogénures de cuivre**

Ces matériaux ont suscité un intérêt au sein de la communauté de la thermoélectricité en raison de leur faible conductivité thermique, ce qui conduit à des propriétés thermoélectriques prometteuses, les BiCuSeO et BaCu₂Se₂ sont deux de ces matériaux.

Ils ont un coefficient Seebeck élevé et une conductivité thermique intrinsèquement très faible, mais leur conductivité électrique est faible, ce qui limite l'amélioration de leurs propriétés thermoélectriques. La conductivité électrique de BiCuSeO est améliorée par dopage par Ba, s'est substitué à S dans BiCuSeO pour réduire les coûts et diminuer la conductivité thermique [14].

- **Les Skutterudites**

Ils ont été identifiés en 1928 par Oftedahl. Ils groupent des composants binaires de compositions MX₃où M est un atome de métal (rhodium :Rh, cobalt : Co ou iridium :Ir) et X un atome de type p (arsenic : As), phosphore : P) et antimoine : Sb).

Leurs structures laissent 2 emplacements vides permettant d'insérer des espèces dans le réseau. Ce remplissage favorise la modification de λ (conductivité thermique) et σ (conductivité électrique) de permettant une augmentation du facteur de puissance ZT (jusqu'à 1,4).

- **Les clathrates**

Ils présentent un fort potentiel thermoélectrique, inorganiques, se sont des solides périodiques avec des nano cages dans lesquelles on peut insérer des atomes lourds (alcalino-terreux, terres rares).

Les cages remplies ont pour diminuer la conductivité thermique atteignant des valeurs proches de celles du verre ou de la silice. Les clathrates sont fait des transformations avant de devenir des semis conducteurs [15].

- **Les oxydes**

En 1997, la découverte du Na_xCoO_2 comme un nouveau matériau thermoélectrique, ils à une stabilité chimique. Les oxydes ont une conductivité thermique faible inférieur à $1\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ et un coefficient de Seebeck élevé supérieur à $100\mu\text{V.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$.

Les oxydes de type p à base de cobalt à un facteur de mérite de l'ordre de l'unité et une performance thermoélectrique élevé. Pour l'instant les oxydes de type n ont un ZT inférieur à 1.

- **Les semis Heuslers**

Ils se composent de 4 réseaux cubiques faces centrées interpénétrées, dont un des sous réseaux est remplacé par un sous réseaux de lacunes. Ceci diminue la conductivité thermique et favorise la diffusion de phonons. Bien que présentant un produit $S^2\sigma$ très élevé que se soit en type n ou p, sa λ reste encore trop élevée [16].

II.5 Effet Thermoélectriques

II.5.1 Effet Seebeck

Le personnage qui est à l'origine de la thermoélectricité est Thomas Johann Seebeck (Figure II.4(a)). Il découvrit en 1821 le premier effet thermoélectrique: l'effet Seebeck. Cet effet correspond au fait qu'un matériau a tendance à se polariser lorsqu'il est soumis à unedifférence de température.

En effet, les porteurs de charge au sein d'un matériau diffusent du côté où la température est la plus basse, produisant ainsi une inhomogénéité de la densité des porteurs suivant le gradient de température. Du fait d'une agitation thermique plus importante du côté chaud, la densité des porteurs de charge y est plus faible que du côté froid.

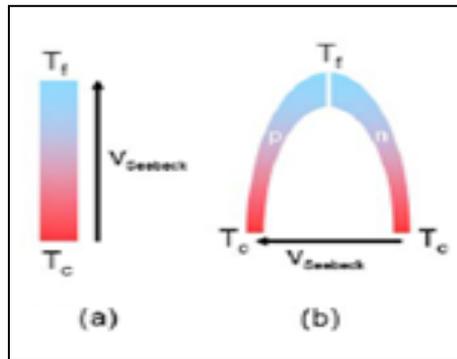


Figure II.4 :(a) Effet Seebeck au sein d'un matériau homogène, (b) Effet Seebeck au sein d'un couple formé de deux matériaux semi-conducteurs p et n [17].

La Figure II.4(a)est une représentation schématique de l'effet Seebeck au sein d'un matériau homogène. L'expression reliant la tension de polarisation $V_{Seebeck}$ du matériau au gradient de température est:

$$V = S \times (T_f - T_c) \tag{II.9}$$

Avec: S : pouvoir thermoélectrique du matériau ou le coefficient Seebeck (en V/K), T_f et T_c les températures absolues aux extrémités respectivement froide et chaude du matériau (en K).

Plus communément, l'effet Seebeck est exploité en associant des couples des matériaux de nature différente. La (Figure II.4(c)) décrit une configuration pour laquelle 2 matériaux semi-conducteurs de type n et p ont été assemblés pour former une jonction. Notons que les coefficients Seebeck de matériaux de type p et n sont respectivement positifs et négatifs. Dans ce cas de figure, la tension Seebeck générée est proportionnelle à la différence des coefficients Seebeck des deux matériaux :

$$V = (S_n - S_p) \times (T_f - T_c) \tag{II.10}$$

Avec S_p et S_n les coefficients Seebeck des matériaux semi-conducteurs de type p et n. L'équation (II.10) révèle l'intérêt inhérent à l'utilisation de couples des matériaux ayant des pouvoirs thermoélectriques opposés afin d'optimiser la tension de polarisation [18].

II.5.2 Effet Peltier

Le physicien Français JEAN PELTIER, En 1834, découvrit le second effet thermoélectrique: une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux semi-conducteurs de nature différente (type p et type n) soumis à un courant électrique. Par l'application d'un courant électrique, un matériau thermoélectrique permettra de générer du la chaleur ou de froid.

Dans ce cas, on considère la situation inverse de l'effet précédent. Lorsqu'un courant électrique va traverser un matériau conducteur, une absorption de chaleur et un dégagement vont se produire à ses extrémités en contact avec un deuxième matériau (Figure II.5), selon l'équation suivant [19]:

$$dQ_s = (\Pi_A - \Pi_B) \vec{j} \cdot \vec{u}_{AB} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

- ✦ dQ_s : la quantité de chaleur absorbée ou émise par unité de surface (W.m^{-2});
- ✦ Π_A, Π_B : les coefficients de Peltier des matériaux A et B (V);
- ✦ \vec{j} : la densité surfacique de courant (le flux de charge) (A.m^{-2});
- ✦ \vec{u}_{AB} : le vecteur (adimensionnel) unitaire dirige du matériau A vers le matériau B au niveau de la jonction considérée.

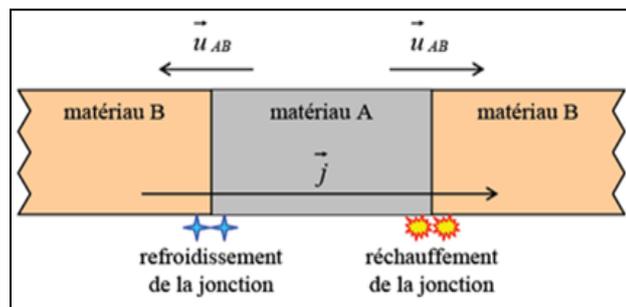


Figure II.5 : Illustration de l'effet Peltier [20].

Le passage d'une densité de courant dans le circuit provoque : l'échauffement de la jonction et provoque le refroidissement de l'autre jonction ou le courant circule du matériau dont le coefficient Peltier est le plus faible vers le matériau dont le coefficient Peltier est le plus fort (la Figure II.5, $\Pi_A > \Pi_B$) [21].

II.5.3 Effet Thomson

Le physicien William Thomson, en 1851 montra que les effets Peltier et Seebeck sont liés. Lorsqu'on applique un courant électrique et une différence de température.

La différence fondamentale avec les deux premiers effets est que ce dernier ne concerne qu'un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction; en d'autres termes, l'effet Thomson définit une chaleur absorbée ou libérée par unité de temps lorsqu'un courant électrique I traverse une région d'un matériau ayant un gradient de température.

L'effet Thomson montre qu'une chaleur dégagée ou absorbée lorsqu'un courant électrique traverse un matériau ayant un gradient de température (voir Figure II.6).

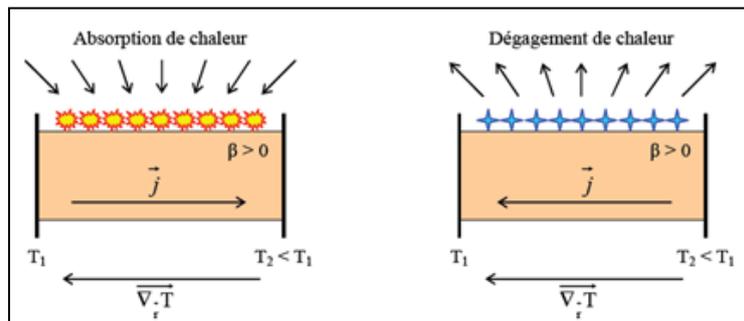


Figure II.5 : Illustration de l'effet Thomson [22].

L'effet Thomson résulte du lien entre les deux effets thermoélectriques décrits précédemment. En considérant un courant électrique traversant un matériau soumis à un gradient de température, il est possible de mettre l'effet de la dégagement de la chaleur quand le courant circule dans le sens de la différence de température (en considérant dans ce cas un matériau ayant un coefficient de Thomson positif) et inversement l'absorption de la chaleur du milieu extérieur quand le courant circule dans le sens inverse de la différence de température.

Ce phénomène est sous la forme d'une équation locale :

$$dQ_v = -\beta \times \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \vec{j} \quad (\text{II.12})$$

- ✦ dQ_v : la quantité de chaleur émise ou absorbée par unité de volume du matériau ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$).
- ✦ β : le coefficient de Thomson ($\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$).
- ✦ T : la température au du matériau ($^{\circ}\text{K}$).
- ✦ r : le point.
- ✦ \vec{j} : le flux de charge ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$) [23].

II.5.4 Effet Joule

Bien qu'il ne soit pas considérée comme un effet thermoélectrique, nous allons mentionner l'effet joule, parce qu'il va coexister avec les autre effets, et il s'avérer géant parfois dans la caractérisation des coefficients thermoélectriques.

Lorsqu'un courant passe dans un matériau, il s'ensuit un dégagement du chaleur proportionnel au carré de l'intensité qui traverse le matériau. Cet effet correspond à la résistance qu'oppose le matériau au mouvement des électrons, responsables du courant électrique. La chaleur de Joule s'exprime par la relation :

$$Q_{\text{Joule}} = RI^2 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- ✦ R : Résistance électrique du matériau.
- ✦ I : Courant électrique [24].

II.6 Conversions thermoélectriques actuelles

Les effets thermoélectriques Peltier et Seebeck montre qu'il est possible de convertir l'énergie thermique en énergie électrique et l'inverse : l'effet Peltier permet de créer un gradient de température entre les extrémités d'un matériau grâce à un courant électrique par contre l'effet Seebeck est utilisé pour générer une tension, donc un courant électrique à partir d'un gradient de température, à l'aide des convertisseurs thermoélectriques, les conversion thermoélectriques sont réalisée, on 'a deux applications thermoélectriques : la génération de puissance électrique ou à la réfrigération.

Ces convertisseurs sont des moteurs thermiques thermodynamiques, ressemblent aux moteurs et réfrigérateurs conventionnels, mais le fluide utilisé par ces derniers (gaz ou liquide) est remplacé par des charges, électrons ou trous. De ce fait, les convertisseurs thermoélectriques n'ont pas de fluide en mouvement ou des parties mécaniques mobiles, d'où un certain nombre d'avantages comme la fiabilité, le fonctionnement silencieux et sans vibrations.

Les convertisseurs sont des moteurs thermodynamiques, ressemblent aux moteurs et réfrigérateurs, le fluide utilisé par eux (gaz ou liquide) est remplacé par les charges : trous ou des électrons. Ils n'ont pas des pièces mécaniques mobiles ou de fluide mobile, pou cela présentent des d'avantages : le fonctionnement silencieux et sans vibrations et la fiabilité [25].

II.6.1 Générateur thermoélectrique

Une différence de potentiel électrique est créée grâce à un gradient de température à deux extrémités d'un matériau , en fait de placé une charge entre les extrémités pour fermer le circuit donc un courant électrique s'établit (effet Seebeck) (Figure II.7(a)).

Le signe du potentiel électrique étant fonction du type de matériau : n ou p et du signe de ΔT , en connectant deux matériaux, l'un de type n et l'autre de type p, thermiquement en parallèle et électriquement en série (figure II.7 (b)), donc on 'a deux branches (types p et n) forment un thermocouple qui constitue la brique de base des dispositifs thermoélectriques.

Par connexion, un module thermoélectrique est formé, toujours en parallèle du point de vue thermique, et en série du point de vue électrique de plusieurs thermocouples (Figure II.7(c)), ce qui provoque une augmentation du potentiel et du courant électrique. Ces modules sont utilisés pour la réalisation des générateurs thermoélectriques TEG (Thermo-Electric Generator) [26].

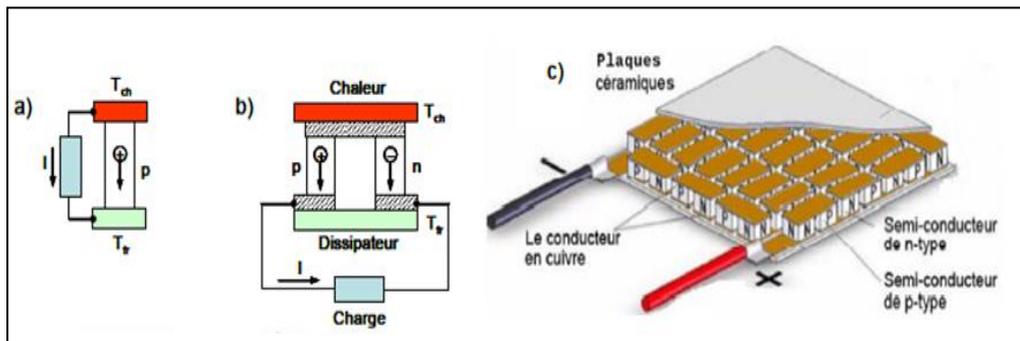


Figure II.6 : (a) Schéma de principe d'une branche thermoélectrique, (b) d'un thermocouple, (c) et d'un module thermoélectrique [27].

II.6.1.1 Rendement de la thermo génération

Le rendement de conversion thermoélectrique d'un thermocouple (Figure 1.3(b)) est donné par la relation (II.14) :

$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{\text{puissance fournie à la charge}}{\text{chaleur absorbée à l'extrémité chaude}} \quad (\text{II.14})$$

Le maximum du rendement obtenu pour une adaptation d'impédance charge- source est donné par:

$$\eta_{max} = \eta_c \times \frac{\sqrt{1 + Z_{AB} \frac{T_{ch} + T_{fr}}{2}} - 1}{\sqrt{1 + Z_{AB} \frac{T_{ch} + T_{fr}}{2}} + \frac{T_{fr}}{T_{ch}}} \quad (\text{II.15})$$

Où : η_c : le rendement de Carnot caractérisé pour les machines thermiques:

$$\eta_c = \frac{T_{ch} - T_{fr}}{T_{ch}} \tag{II.16}$$

Le coefficient Z_{AB} est défini par:

$$Z_{AB} = \frac{(S_A - S_B)^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_A}{\sigma_A}} + \sqrt{\frac{\lambda_B}{\sigma_B}}\right)^2} \tag{II.17}$$

Avec : $(S, \lambda, \sigma)_{A,B}$ sont : le coefficient Seebeck, conductivité thermique et , la conductivité électrique des matériaux A et B.

L'équation (II.15) montre que le rendement maximal η_{max} est une fonction croissante du facteur Z_{AB} quand Z_{AB} tend vers infini, il tend vers le rendement de Carnot. En considérant la température T_{fr} égale à la température ambiante, le rendement donné par l'équation(II.14) est présenté sur la Figure (II.8) pour différentes valeurs de Z_{AB} en fonction de la différence de température $\Delta T = (T_{ch} - T_{fr})$.

La Figure II.8 montre que l'augmentation du rendement requière l'utilisation des matériaux de facteur Z_{AB} élevé [28].

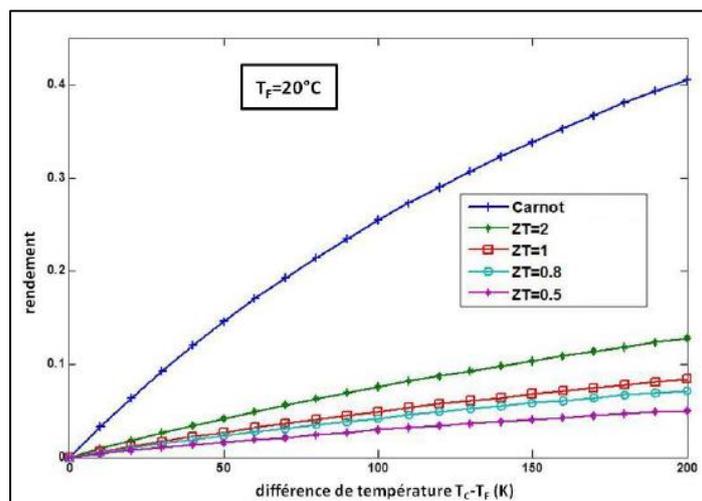


Figure II.7 : Rendement thermoélectrique en fonction de la différence de température pour différentes valeurs du facteur de mérite [29].

D'après l'équation(II.17), le 'facteur de mérite' Z_{AB} d'un thermocouple, est augmenté lorsqu'on utilise des matériaux qui présentent des coefficients S_A et S_B de signes différents, c'est-à-dire des matériaux de types différents: n et p (thermocouple à deux branches n et p).

II.6.2 Refroidisseur thermoélectrique

Présenté sur la Figure II.8(a); il est utilisé comme un réfrigérateur si la charge est remplacée par une alimentation. Par effet Peltier, le courant qui circule dans le circuit établit un gradient de température ΔT entre les deux côtés du thermocouple, la principale application de ce type de thermocouple est pour la fonction de refroidisseur, tout comme pour les générateurs électrique, un gradient de température plus important est obtenu par la connexion en série des plusieurs thermocouples (Figure II.8(b)) et par des montages composés des plusieurs modules (Figure II.8(c)) [30].

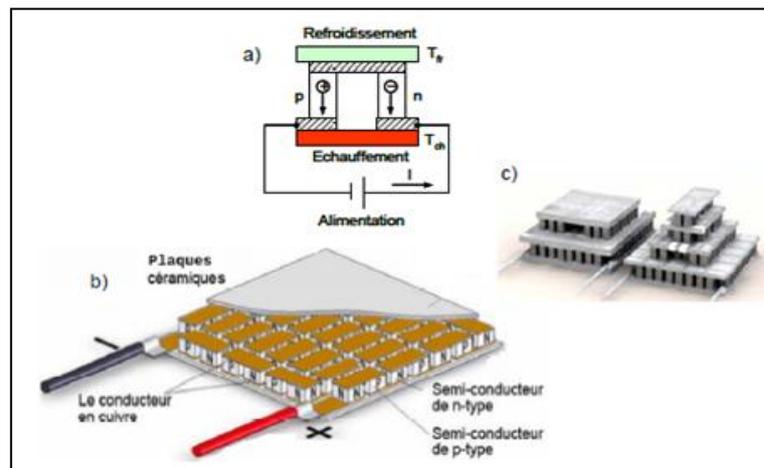


Figure II.8 : (a) Schéma de principe d'un thermocouple thermoélectrique, (b) module thermoélectrique, et (c) convertisseurs complets composés des plusieurs modules [31].

II.6.2.1 Rendement de la thermoréfrigération

Le rendement utilisé en mode de refroidissement : Φ , ou coefficient de performance COP 'Coefficient of Performance' est présenté par l'équation suivante :

$$\Phi = COP = \frac{Q}{P} = \frac{\text{chaleur extraite du coté froid}}{\text{puissance électrique fournie}} \tag{II. 18}$$

On considère que la perte de chaleur est négligeable, le rendement est exprimé en fonction du facteur de mérite Z_{AB} sur l'équation (II.19) avec les températures T_{fr} et T_{ch} [32]:

$$\eta_{\max} = \varepsilon_c \times \frac{\sqrt{1 + Z_{AB} \frac{T_{ch} + T_{fr}}{2} - \frac{T_{ch}}{T_{fr}}}}{\sqrt{1 + Z_{AB} \frac{T_{ch} + T_{fr}}{2} + 1}} \quad (\text{II.19})$$

Où : ε_c représente le coefficient de performance de Carnot:

$$\varepsilon_c = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}} \quad (\text{II.20})$$

Par l'équation (II.19), le rendement maximum d'un thermocouple pour le refroidissement est une fonction croissante de Z_{AB} [33].

II.6.2.2 Exemple de la réfrigération

II.6.2.2.1 Module hybride thermoélectrique-photovoltaïque

Pour les cellules photovoltaïques, l'inconvénient majeur est leur faible rendement, une partie de la puissance du rayonnement incident peut être convertie en électricité et le panneau photovoltaïque est échauffé par les radiations non converties ce qui réduit encore le rendement, donc l'idée de réaliser des systèmes combinés thermoélectriques- photovoltaïques.

Cette combinaison permet de refroidir les cellules photovoltaïques ce qui évite la perte de rendement électrique et encore de récupérer une partie de l'énergie perdue sous forme de chaleur et de la transformer en énergie électrique, grâce aux modules thermoélectriques fonctionnant en mode Seebeck [34].

- **Explication du phénomène**

Les panneaux photovoltaïques soumis à des fortes irradiances (ensoleillement) perdent de leur efficacité car la température est sur 60-80°C sur la surface qui reçoit les rayonnements.

Des systèmes de refroidissement sont utilisés pour diminuer cette température, mais ces systèmes consomment cette énergie produite par le panneau photovoltaïque. Les recherches ont montré qu'on peut intégrer des modules thermoélectriques à l'arrière des panneaux photovoltaïques afin d'augmenter la quantité d'énergie produite.

La figure II.14 représente un module hybride thermoélectrique-photovoltaïque.

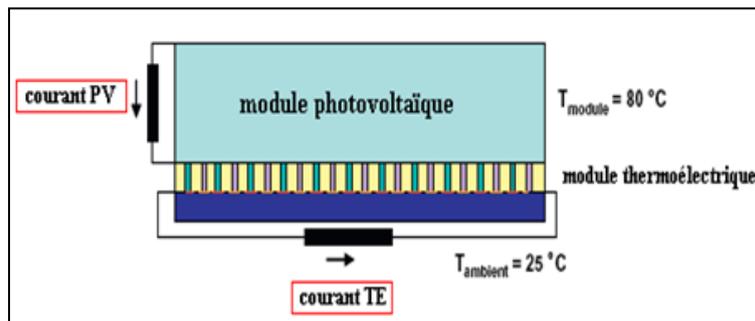


Figure II.9 : schéma d'un module hybride thermoélectrique-photovoltaïque [35].

Le rendement des cellules solaire est diminuée lorsque la température sur la surface des panneaux photovoltaïques peut atteindre 80°C. En plaçant des modules thermoélectriques pour exploiter cette haute température, sur la face arrière des modules photovoltaïques de façon que cette haute température puisse atteindre les modules thermoélectriques d'un côté et de l'autre côté on a la température ambiante de 25°C.

Par définition de l'effet Seebeck donc on aura une génération de courant, donc le courant total généré par le système hybride thermoélectrique-photovoltaïque est :

$$I_{PVTE} = I_{PV} + I_{TE} \tag{II.21}$$

Avec :

- ✦ I_{PV} : courant photovoltaïque (A).
- ✦ I_{TE} : courant thermoélectrique(A).

La puissance globale générée est la somme des deux puissances générées par le module thermoélectrique et le panneau solaire :

$$P_{PVTE} = P_{PV} + P_{TE} \quad (\text{II. 22})$$

Avec :

- ✦ P_{PV} : puissance photovoltaïque (W).
- ✦ P_{TE} : puissance thermoélectrique(W).

Le rendement du système hybride s'écrit alors :

$$\eta_{PVTE} = \eta_{PV} + (1 - \eta_{PV})\eta_{TE} \quad (\text{II. 23})$$

Avec:

- ✦ η_{PV} : rendement photovoltaïque (%).
- ✦ η_{TE} : rendement thermoélectrique(%) [36].

Bibliographie:

- [1] D. Astrain, J. G. Vián, A. Martínez, and A. Rodríguez, ‘Study of the influence of heat exchangers’ thermal resistances on a thermoelectric generation system’, *Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 602-610, 2010.
- [2] C.C. Wang, C.I. Hung, and W.H. Chen, ‘Design of heat sink for improving the performance of thermoelectric generator using two-stage optimization’, *Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 236-245, 2012.
- [3] R.L. Cataldo and G.L. Bennett, U.S., ‘Space Radioisotope Power Systems and Applications: Past, Present and Future’, *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences*. 2011.
- [4] R.D. Abelson, ‘Space Missions and Applications’, in *Thermoelectrics Handbook*, 2010, pp. 56-6.
- [5] B. Mazar, ‘State of the art prototype vehicle with a thermoelectric generator’ presented at the *Thermoelectrics Applications Workshop 2012*, Munich, Germany, 2012.
- [6] D. Crane, ‘Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles Gentherm Inc.’, 05/17/13 available at http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/sites/default/files/ace080_crane_2013_o.pdf, 17-May-2013.
- [7] L. Aixala, ‘Renoter project,’ in *3rd Thermoelectrics Applications Workshop 2012*, 2012.
- [8] A. Sizmann, H. Kuhn, J. Steinwandel, C. Peineke, A. Westenberger, and M. Schwarze, ‘Prospects and Plans for the Introduction of Other Renewable Energy Sources for Aviation’, *SWAFEA formal report D.5.1*, 2011.
- [9] T. Kousksou, J.P. Bédécarrats, D. Champier, P. Pignolet, and C. Brillet, ‘Numerical study of thermoelectric power generation for an helicopter conical nozzle’, *J. Power Sources*, Vol. 196, No. 8, pp. 4026-4032, 2011.
- [10] N.R. Kristiansen and H.K. Nielsen, ‘Potential for usage of thermoelectric generators on ships’, *J. Electron. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1746-1749, 2010.
- [11] G. Shu, Y. Liang, H. Wei, H. Tian, J. Zhao, and L. Liu, ‘A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships’ *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 19, pp. 385-401, 2013.
- [12] World Energy Outlook 2010 Edition. *International Energy Agency Publications*, France, 2010.

- [13] D. Champier, J.P. Bédécarrats, T. Kousksou, M. Rivaletto, F. Strub, and P. Pignolet, ‘Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove’ *Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 1518-1526, 2011.
- [14] C. Favarel, D. Champier, J.P. Bedecarrats, T. Kousksou, and F. Strub, ‘Study of a thermoelectric system equipped with a maximum power point tracker for stand-alone electric generation’, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1449, No. 1, pp. 520-523, 2012.
- [15] D. Champier, C. Favarel, J.P. Bédécarrats, T. Kousksou, and J.F. Rozis, ‘Prototype Combined Heater/Thermoelectric Power Generator for Remote Applications’, *J. Electron. Mater.*, Vol. 42, No. 7, pp. 1888-1899, 2013.
- [16-17] G. Friedl, W. Moser, A. McCarry, K. Berndt, and R. Schöpke, ‘Micro-CHP - Experiences with thermoelectric generators integrated in a wood pellet combustion unit’, in 28th International and 7th European Conference on Thermoelectrics, 2009.
- [18] E. Höftberger, W. Moser, W. Aigenbauer, G. Friedl, and W. Haslinger, ‘Grid autarchy of automated pellets combustion systems by the means of thermoelectric generators’, in Konferenz Automotive Goes Thermoelectrics, 2010.
- [19] M. Codecasa, C. Fanciulli, R. Gaddi, and F. Passaretti, ‘Design and Development of a TEG Cogenerator Device Integrated in Self Standing Gas Heaters’ in 9th European Conference on Thermoelectrics, 2011.
- [20] D. Samson, T. Otterpohl, M. Kluge, U. Schmid, and T. Becker, ‘Aircraft-Specific Thermoelectric Generator Module’, *J. Electron. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 2092-2095, 2010.
- [21] V. Leonov, R.J.M. Vullers, and C.V. Hoof, ‘Thermoelectric generator hidden in a shirt with a fabric radiator’, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1449, No. 1, pp. 556-559, 2012.
- [22] V. Leonov, T. Torfs, R. Vullers, and C. Van Hoof, ‘Hybrid Thermoelectric-Photovoltaic Generators in Wireless Electroencephalography Diadem and Electrocardiography Shirt’, *J. Electron. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1674-1680, 2010.
- [23] M. Lossec, ‘Systèmes multisources de récupération d’énergie dans l’environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement’, École Normale Supérieure de Cachan, 2011.
- [24] K. McEnaney, D. Kraemer, and Z. R. G. Chen, ‘Modeling of concentrating solar thermoelectric generators’, *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, No. 7, 2011.

- [25] F. Meng, L. Chen, and F. Sun, 'A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities', *Energy*, Vol. 36, No. 5, pp. 3513-3522, May 2011.
- [21] E.J. Sandoz-Rosado, S.J. Weinstein, and R.J. Stevens, 'On the Thomson effect in thermoelectric power devices', *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 66, pp. 1-7, 2013.
- [22] D. Wee, 'Analysis of thermoelectric energy conversion efficiency with linear and nonlinear temperature dependence in material properties', *Energy Convers. Manag.*, Vol. 52, No. 12, pp. 3383-3390, 2011.
- [23] G. Fraisse, J. Ramousse, D. Sgorlon, and C. Goupil, 'Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements', *Energy Convers. Manag.*, Vol. 65, pp. 351-356, 2013.
- [24] H. Lee, 'The Thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers', *Energy*, Vol. 56, pp. 61-69, 2013.
- [25] N. Q. Nguyen and K. V. Pochiraju, 'Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat sources', *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 51, No. 1-2, pp. 1-9, 2013.
- [26] D.T. Crane, 'An introduction to system-level, steady-state and transient modeling and optimization of high-power-density thermoelectric generator devices made of segmented thermoelectric elements', *J. Electron. Mater.*, Vol. 40, No. 5, pp. 561-569, 2011.
- [27] J.Y. Jang, Y.C. Tsai, and C.W. Wu, 'A study of 3-D numerical simulation and comparison with experimental results on turbulent flow of venting flue gas using thermoelectric generator modules and plate fin heat sink', *Energy*, Vol. 53, pp. 270-281, 2013.
- [28] X. Gou, S. Yang, H. Xiao, and Q. Ou, 'A dynamic model for thermoelectric generator applied in waste heat recovery', *Energy*, Vol. 52, pp. 201-209, 2013.
- [29] S. Kumar, S. Heister, X. Xu, J. Salvador, and G. Meisner, 'Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis', *J. Electron. Mater.*, Vol. 42, No. 4, pp. 665-674, 2013.
- [30] S. Kumar, S. Heister, X. Xu, J. Salvador, and G. Meisner, 'Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part II: Parametric Evaluation and Topological Studies', *J. Electron. Mater.*, Vol. 42, No. 6, pp. 944-955, 2013.

- [31] C. Suter, Z. R. Jovanovic, and A. Steinfeld, 'A 1 kWe thermoelectric stack for geothermal power generation - Modeling and geometrical optimization', *Appl. Energy*, Vol. 99, pp. 379-385, 2012.
- [32] S. Bélanger and L. Gosselin, 'Multi-objective genetic algorithm optimization of thermoelectric heat exchanger for waste heat recovery,' *Int. J. Energy Res.*, Vol. 36, No. 5, pp. 632-642, 2012.
- [33] J.Y. Jang and Y.C. Tsai, 'Optimization of thermoelectric generator module spacing and spreader thickness used in a waste heat recovery system', *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 51, No. 1-2, pp. 677-689, 2013.
- [34] W.H. Chen, C.Y. Liao, C.I. Hung, and W.L. Huang, 'Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions,' *Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 874-881, 2012.
- [35] Technical Data Sheet: Thermonamic Products - Available at:<<http://www.thermonamic.com/TEHP1-12656-0.3-English.pdf>> [accessed 18.12.2012].
- [36] Technical Data Sheet: Thermonamic Products - Available at:<<http://www.thermonamic.com/PbTeIngotspecificationsheet-English%20version.pdf>> [accessed 18.12.2012]."

Chapitre 3

MODELISATION

D'UN

GENERATEUR

THERMOELECTRIQUE

III.1 Introduction

Les effets thermoélectriques sont l'un des phénomènes physique qui caractérise certains matériaux semi-conducteurs sur la conversion de l'énergie.

En génération thermoélectrique, l'application la plus connue est la montre Thermatron qui utilise la chaleur du corps humain.

Mais ces générateurs peuvent être adaptés dans les autres équipements portables et pourront être couplés aux panneaux photovoltaïques pour augmenter la génération du courant électrique [1].

Ce chapitre sera consacré au Générateur thermoélectrique. Nous présenterons son architecture ainsi que le fonctionnement et les équations caractéristiques de ce dernier. Après la modélisation et le dimensionnement de ce générateur par Matlab.

L'objectif de ce chapitre est développer un modèle pour ce la nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour modélisé notre générateur thermoélectrique et en fin le programmé par le Matlab.

III.2 Phénomènes physiques

Quatre phénomènes physiques de base peuvent être associées à le fonctionnement des dispositifs thermoélectriques: L'effet Seebeck, Peltier, Thomson, et l'effet Joule.

L'effet Seebeck est la tension générée lorsqu'un changement de température est maintenu entre deux côtés d'un module thermoélectrique.

L'effet Peltier est le chauffage ou l'effet de refroidissement observé quand un courant électrique est traversé deux jonctions dissemblables.

L'effet Thomson, le réchauffent ou le refroidissement observé lorsqu'un courant électrique est passé à la direction d'un gradient de température.

L'effet Joule est l'effet de chauffage observé dans un conducteur électrique lorsque le courant passe à travers le conducteur.

Un module thermoélectrique typique se compose de deux plaques en céramique avec plusieurs semi-conducteurs p et de type n connectés thermiquement en parallèle et électriquement en série, voir dans la figure suivante:

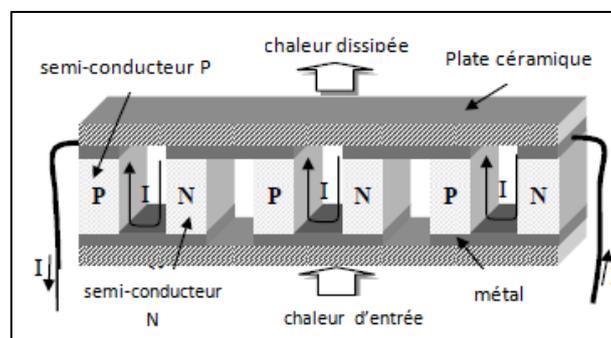


Figure III.1 : Le schéma d'un module thermoélectrique [2].

Dans les conditions d'état stable, lorsque la contribution de flux d'énergie à travers un volume unitaire, des phénomènes associés à des dispositifs thermoélectriques peuvent être décrits par l'équation différentielle suivante et représentées sur la figure 2:

$$TJ \frac{d\alpha}{dx} + \tau J \frac{dT}{dx} - \rho J^2 - \frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (\text{III. 1})$$

Où :

- ✦ T : la température absolue (°K),
- ✦ J : la densité de courant électrique (A/cm²),
- ✦ α : le coefficient de Seebeck (V/°K),
- ✦ τ : le coefficient Thomson (V/°K),
- ✦ ρ : la résistivité électrique (Ω.cm),
- ✦ k : la conductivité thermique du matériau.

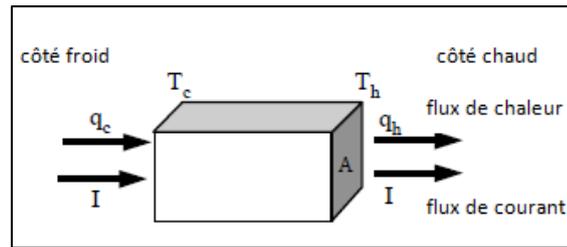


Figure III.2 : Définition du courant et de chaleur s'écoule dans un bar homogène[3].

Ou :

- ✦ T_c : la température du côté froid,
- ✦ T_h : la température du côté chaud,
- ✦ q_c : la chaleur absorbée dans le côté froid,
- ✦ q_h : la chaleur générée dans le côté chaud, et
- ✦ I : le courant électrique.

On considère un dispositif thermoélectrique comme un couple de deux semi-conducteurs différents (N et P), pour que le coté N, on a l'équation suivante:

$$K_N \frac{d^2T}{dx^2} - \tau_N J \frac{dT}{dx} + \rho_N J^2 = 0 \quad (\text{III. 2})$$

Où :

- ✦ k_N , τ_N et ρ_N sont des propriétés thermoélectriques.

Pour le coté P, des propriétés différentes et une direction opposée de courant, l'équation correspondant au flux de chaleur à la jonction de deux conducteurs différents au côté froid c'est:

$$q_c = \alpha T_c I + \frac{1}{2} \tau_m I \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T \quad (\text{III. 3})$$

Sur le côté chaud:

$$q_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} \tau_m I \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T \quad (\text{III. 4})$$

Où:

★ τ_m , R_m et K_m sont propriétés d'un couple.

La puissance électrique est égale à la différence entre flux de chaleur sur le côté chaud et flux de la chaleur au côté froid:

$$q_e = q_h - q_c = \alpha (T_h - T_c) I - \tau_m I \Delta T + I^2 R_m \quad (\text{III. 5})$$

Ainsi, la tension thermoélectrique finale est [3]:

$$V_p = \alpha (T_h - T_c) + I R_m \quad (\text{III. 6})$$

III.3 Les paramètres et les caractéristiques d'un générateur thermoélectrique

Avant d'étudier les différentes possibilités d'optimisation des propriétés thermoélectriques, nous allons revenir sur les propriétés et les caractéristiques principales de la thermoélectricité.

III.3.1 Facteur de mérite

La figure suivante représente la variation de ce facteur en fonction de la température :

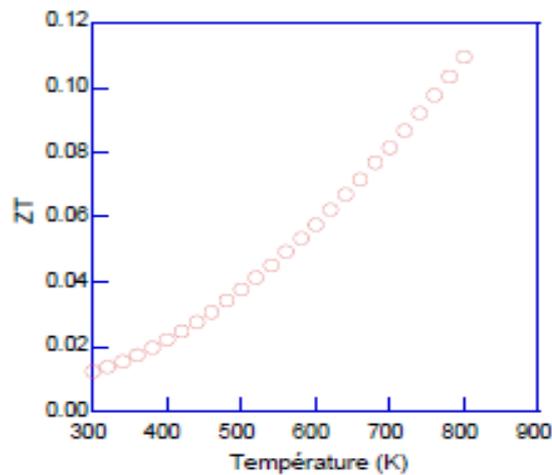


Figure III.3 : Évolution du facteur ZT du Mo₃Sb₇ à haute température [4].

III.3.2 Rendement de conversion

La figure III.4, ci-dessous, montre l'importance d'un fort facteur (ZT) de mérite pour obtenir un bon rendement. Elle présente le rendement de conversion thermoélectrique en fonction de la variation de la température et pour des différentes valeurs de facteurs de mérite.

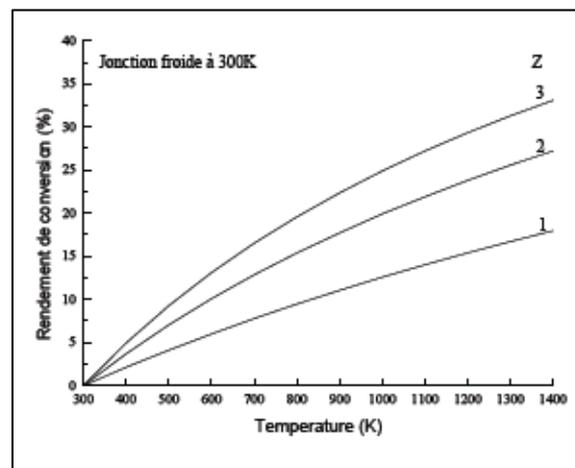


Figure III.4 : Évolution du rendement de conversion thermoélectrique en fonction du coefficient de mérite (ZT) [5].

Il apparaît pour la conversion, qu'une augmentation du gradient de température entraîne à une augmentation la de chaleur [5].

III.3.3 Tension de Seebeck

Les performances thermoélectriques sont présentées par ce paramètre. La figure 5 représente la tension de Seebeck en fonction de la différence de température :

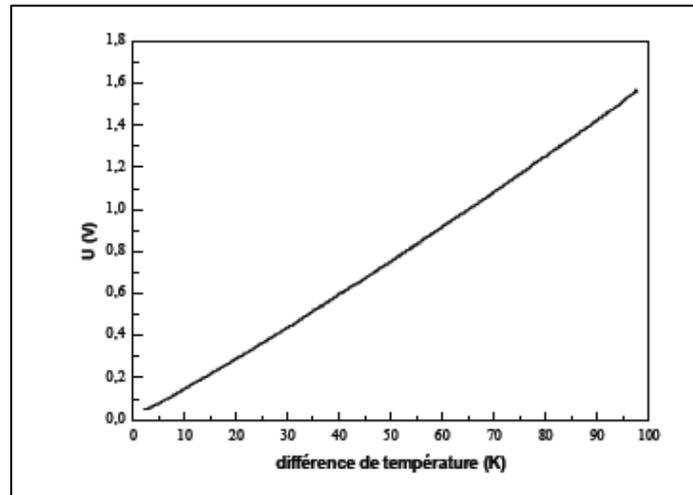


Figure III.5 : La tension Seebeck en fonction de la différence de température [6].

III.3.4 Puissance électrique

La puissance électrique P, ou W est donné en fonction de la différence de température ΔT et de l'effet Seebeck, présentée par l'équation suivante:

$$W = (S_p - S_n) I \Delta T \quad (\text{III. 7})$$

La figure (III.6) représente l'évolution de la puissance électrique en fonction de la différence de température. Les performances étant principalement dues à des pertes thermiques.

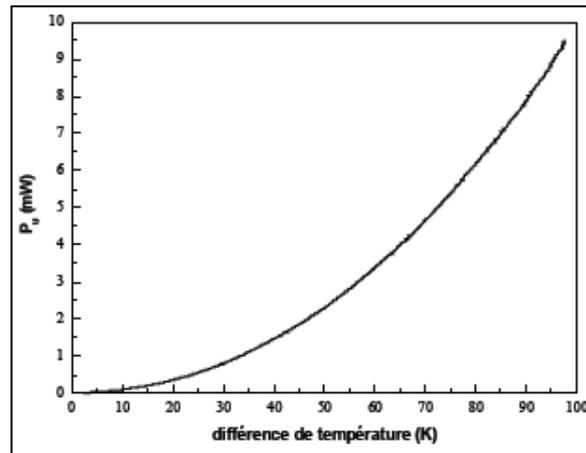


Figure III.6. La puissance récupérée en fonction de la différence de température [7].

III.4 Modèle électrique

Un dispositif thermoélectrique peut être modélisé par un trois ports: deux ports thermiques et d'un port électrique (la Figure III.7):

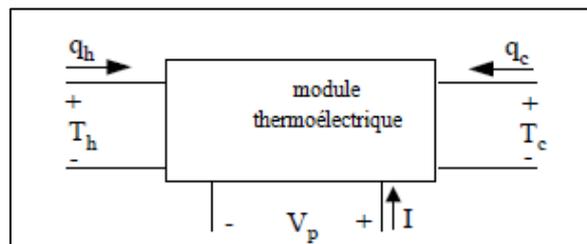


Figure III.7. Trois modèles de port pour un élément de thermoélectrique [8].

A. Ports thermiques

Le Tableau I présente les analogies entre les variables électriques et les variables thermiques qui seront utilisés.

Variables thermique	variable électrique
Flux de chaleur (W)	Flux de courant (A)
Variation de température (K)	Tension (V)
Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Conductivité électrique ($\Omega^{-1}m^{-1}$)
Capacité thermique (J/K)	Capacité électrique (F)

Tableau III.1 : Les analogies entre les variables électriques et thermiques

Le modèle thermique se traduit par le circuit représenté à la Figure8:

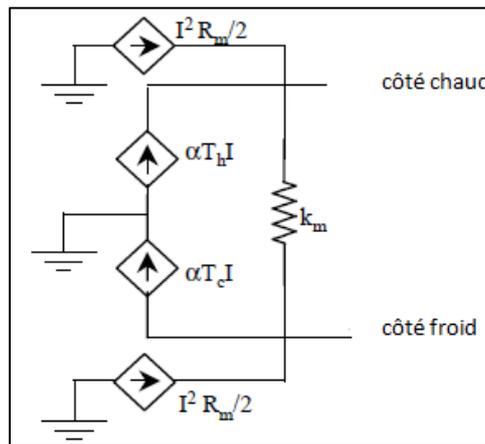


Figure III.8. Modèle thermique proposé [9].

Le modèle proposé est équivalent au modèle présentée dans la figure9 où nous avons la puissance électrique d'entrée (P_e) et le flux de chaleur absorbé à la surface froide.

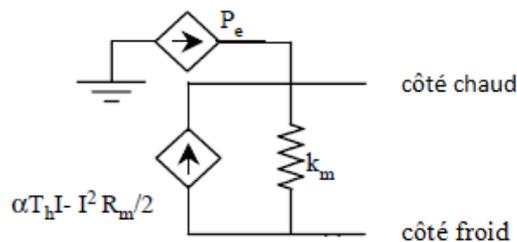


Figure III.9. Modèle équivalent pour le circuit thermique [10].

Maintenant, nous pouvons ajouter deux condensateurs, en compte la capacité thermique de chaque côté du module thermoélectrique. La Figure 10 montre le modèle complet, C_h est le condensateur pour le côté chaud et C_c est le condensateur pour le côté froid.

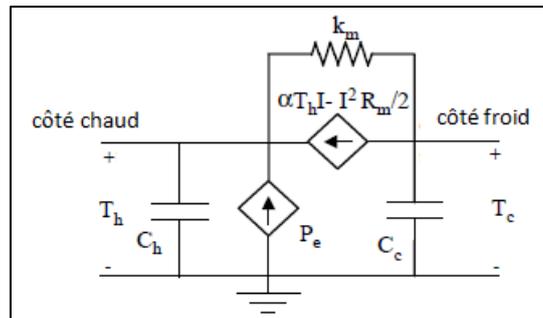


Figure III.10 : Circuit thermique avec la capacité thermique du côté froid : C_c et le côté chaud : C_h [11].

B. Port électrique

Le comportement électrique est modélisé par une source de tension en fonction de la différence de température entre des surfaces chaudes et froides, et une résistance à l'Effet Joule. La figure 11 représente le circuit électrique envisagée, où V_a est la tension produite par deux conducteurs différents [7]:

$$V_\alpha = \alpha(T_h - T_c) \quad (\text{III. 8})$$

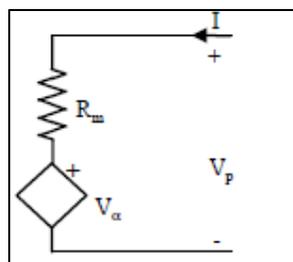


Figure III.11 : Modèle électrique [12].

C. Modèle complet

Comme on peut le voir sur la figure 12, qui montre la structure du circuit équivalent proposé pour un élément thermoélectrique, constitué d'un circuit thermique et électrique:

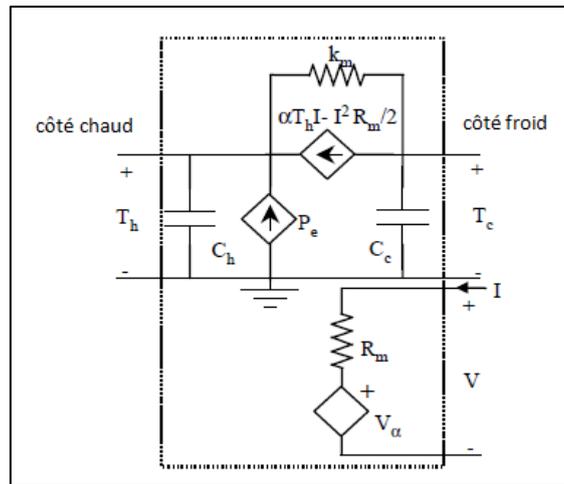


Figure III.12 : Modèle du circuit thermique et électrique [13].

III.5 Modélisation et dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique

Afin de modéliser le comportement de notre générateur nous avons utilisés le modèle et la méthode des éléments finis.

III.5.1 Présentation de la méthode: Le modèle des éléments finis

Dans cette dernière, nous considérons que le système est composé de trois domaines avec quatre limites (Voir Figure III.13).

Chaque sous-domaine avec ses équations de la conservation de flux de la chaleur sont présentés dans la figure suivante:

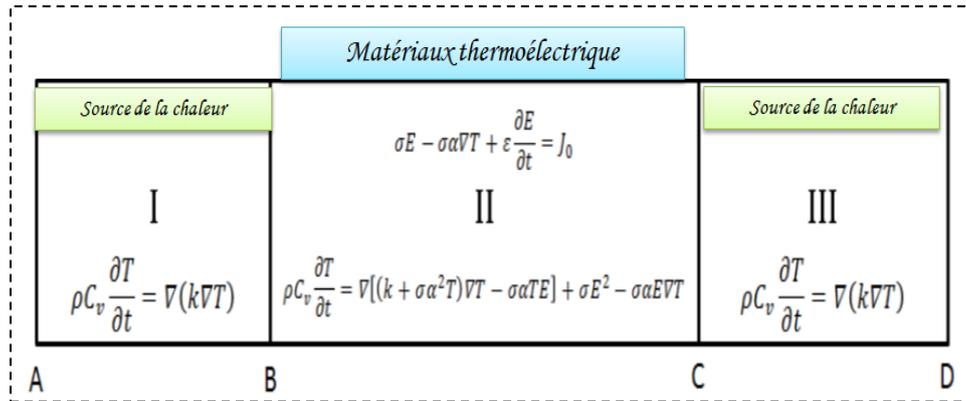


Figure III.13 : Sous-domaines avec ses équations [14].

Les sous-domaines I et III constituent la source de chaleur, le sous-domaine II représente le « *matériau thermoélectrique* ».

III.5.2 Explication du phénomène Étude thermique

En utilisant le principe de conservation de flux de chaleur présentée par les équations (III.9) et (III.10), nous avons les équations thermoélectriques reportés dans la figure III.13:

$$\Delta J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{III. 9})$$

Avec:

- ✦ J: la densité surfacique de courant (ou le flux de charge) (A.m^{-2}).
- ✦ ρ : la résistivité électrique ($\Omega.m$).
- ✦ t: le temps (s).

$$\nabla q + \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} = EJ \quad (\text{III. 10})$$

Avec :

- ✦ q: le flux de chaleur (W).
- ✦ ρ : la résistivité électrique ($\Omega.m$).
- ✦ C_v : la capacité thermique ($\text{j}/^\circ\text{K}$).

- ✦ T: la température (°K).
- ✦ t: le temps (s).
- ✦ Q: la quantité de chaleur émise (positif) ou absorbée (négatif) par unité de surface à l'une des deux jonctions (W.m^{-2}).
- ✦ E: le champ électrique (V/m).
- ✦ J : la densité surfacique de courant (ou le flux de charge) (A.m^{-2}).

Les conditions aux limites thermiques:

A: flux de chaleur (q_0) s'écrit sous la forme :

$$q_0 = -K \frac{dT}{dx} \quad (\text{III. 11})$$

- ✦ K : la conductivité thermique ($\text{W/m.}^\circ\text{K}$).
- ✦ T : la température (°K).
- ✦ x : la longueur (m).

B: On considère que la chaleur est continue à travers l'interface (équilibre du flux):

$$J = J_0 \quad (\text{III. 12})$$

- ✦ J: la densité surfacique de courant (ou le flux de charge) (A.m^{-2}).
- ✦ J_0 : le flux de charge (A.m^{-2}). à $t=0$, avec: t =le temps (s).

C: La chaleur est continue à travers l'interface: on prend la tension $V = 0$, la température est:

$$T = T_{\text{ambiante}} \quad (\text{III. 13})$$

D: On suppose que la conductivité thermique (k), le facteur de la résistivité électrique et la capacité thermique (ρC_v) et la conductivité électrique (σ) sont des constantes pour chaque sous-domaine.

Dans le sous-domaine II: on prend $\alpha=S=\alpha(T)$ comme une fonction de la température, on s'intéresse au gradient de température qui donne l'effet Seebeck.

Équations de la chaleur sur les sous-domaines I et III

Les équations de la chaleur sur la majeure partie des sous-domaines I et III sont données par la relation :

$$\rho C_v \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{K}{\Delta x} \left[\left(\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \right) + \left(\frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} \right) \right] \tag{III. 14}$$

- ✦ ρ : la résistivité électrique ($\Omega.m$).
- ✦ C_v : la capacité thermique ($J/^\circ K$).
- ✦ T_i : la température au point (i) ($^\circ K$).
- ✦ t: le temps (s).
- ✦ K: la conductivité thermique ($W/m.^\circ K$).
- ✦ x : la longueur (m).
- ✦ T_{i+1} : la température au point (i+1) ($^\circ K$).
- ✦ T_{i-1} : la température au point (i-1) ($^\circ K$).

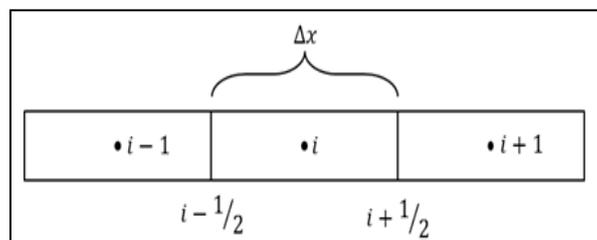


Figure III.14 : Nœuds en sous-domaine I et III [15].

Le nœud: c'est un point dans lequel les intensités des courants entrent et sortant.

- **Équation de la chaleur à la limite A :** (Voir la Figure III.13)

L'équation de la chaleur à la limite de ce domaine est : [16]

$$\rho C_v \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{K}{\Delta x} \left[\left(\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \right) - q_0 \right] \quad (\text{III. 15})$$

- ✦ ρ : la résistivité électrique ($\Omega \cdot m$).
- ✦ C_v : la capacité thermique ($J/^\circ K$).
- ✦ T_i : la température au point (i) ($^\circ K$).
- ✦ t: le temps (s).
- ✦ K: la conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ K$).
- ✦ x : la longueur (m).
- ✦ T_{i+1} : la température au point (i+1) ($^\circ K$).
- ✦ T_{i-1} : la température au point (i-1) ($^\circ K$).
- ✦ q_0 : flux de chaleur à t=0 (W).

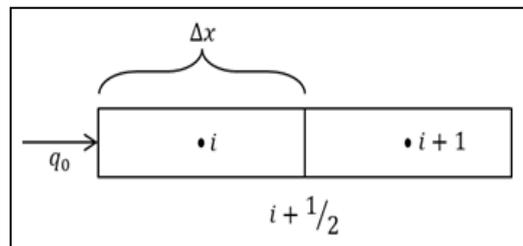


Figure III.15 : Coté de A [17].

▪ **Équation de la chaleur à la limite D**

L'équation de la chaleur à limite de D devient :

$$\rho C_v \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{K}{\Delta x} \left[\frac{T_a - T_i}{\Delta x/2} - \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \right] \quad (\text{III. 16})$$

- ✦ ρ : la résistivité électrique ($\Omega \cdot m$).
- ✦ C_v : la capacité thermique ($J/^\circ K$).
- ✦ T_i : la température au point (i) ($^\circ K$).
- ✦ t: le temps (s).
- ✦ K : la conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ K$).

- ✦ x : la longueur (m).
- ✦ T_a : la température ambiante (°K).
- ✦ T_{i-1} : la température au point (i-1) (°K).

▪ *Équation de la chaleur à la limite B et C*

Les équations de la chaleur sur la majeure partie de B et C sont données par les relations :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_g = \frac{T_{i-1/2} - T_{i-1}}{\Delta x_g/2} \quad (\text{III. 17})$$

- ✦ T : la température (°K).
- ✦ x_g : la longueur du côté gauche (m).
- ✦ $T_{i-1/2}$: la température au point (i-1/2)(°K).
- ✦ T_{i-1} : la température au point (i-1) (°K).

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_d = \frac{T_i - T_{i-1/2}}{\Delta x_d/2} \quad (\text{III. 18})$$

- ✦ T : la température (°K).
- ✦ x_d : la longueur du côté droite (m).
- ✦ T_i : la température au point (i) (°K).
- ✦ $T_{i-1/2}$: la température au point (i-1/2) (°K).

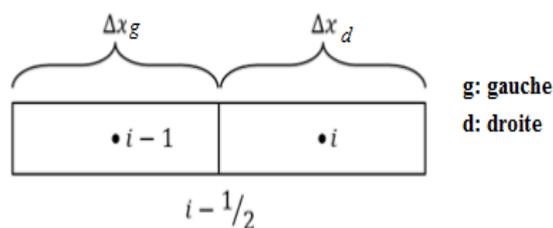


Figure III.16. La limite de B et C [18].

III.5.3 Étude thermoélectrique avec le modèle des éléments finis

Dans notre étude, un intérêt particulier est porté au matériau thermoélectrique puis se trouve dans le sous domaine II entre les points B et C présenté par la figure suivante :

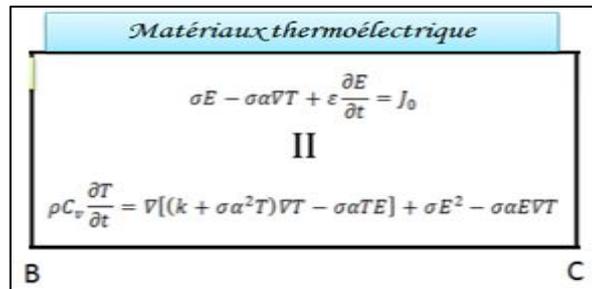


Figure III.17 : Sous-domaines II avec ses équations [19].

Circuit équivalent thermique-thermoélectrique

Le premier pas dans l'élaboration d'un modèle de circuit équivalent est de convertir les propriétés de Conductivité du matériau puis on les considère dans les équations en composants de circuits, tels que la résistance et de la capacité.

Le champ électrique doit être rédigé en termes de tension, aussi il se définit par l'équation suivante:

$$W(x, t) = E \Delta x \tag{III. 19}$$

Avec :

- ✦ W: la tension(V).
- ✦ E: le champ électrique (V/m).
- ✦ x : la longueur du module thermoélectrique (m).
- ✦ t: le temps de la génération du courant (s).

En tenant compte des divers paramètres on obtient deux équations donnant l'expression de la capacité en fonction de la température et du temps:

$$C_{th} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{W_i^2}{\Delta R_e} - \alpha_i \frac{W_i T_{i+1} - T_{i-1}}{2 \Delta R_e} + \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta R_{th}} + \frac{\alpha_i^2}{2 \Delta R_e} (T_{i+1}^2 - 2T_i^2 + T_{i-1}^2) - \frac{\alpha_i^2}{4 \Delta R_e} [(T_{i+1} - T_i)(W_{i+1} - W_i) + (T_{i-1} - T_i)(W_{i-1} - W_i)] \quad (III. 20)$$

$$C_e \frac{\partial W_i}{\partial t} = I_0 - \frac{W_i}{\Delta R_e} - \alpha_i \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2 \Delta R_e} \quad (III. 21)$$

- ✦ C_{th} : la capacité thermique (j/°K).
- ✦ T_i : la température au point (i) (°K).
- ✦ t : le temps (s).
- ✦ W_i : la tension au point (i) (V).
- ✦ R_e : la résistance électrique(Ω).
- ✦ α_i : coefficient de Seebeck ou le pouvoir thermoélectrique au point (i)(V.K⁻¹).
- ✦ T_{i+1} : la température au point (i+1) (°K).
- ✦ T_{i-1} : la température au point (i-1) (°K).
- ✦ R_{th} : la résistance thermique (m².°K/W).
- ✦ W_{i+1} : la tension au point (i+1) (V).
- ✦ W_{i-1} : la tension au point (i-1) (V).
- ✦ C_e : la capacité électrique(j/V).
- ✦ I_0 : le courant électrique à t=0s (A).

Les termes dans l'équation précédente (III.21) peuvent être considérés comme des courants dans un nœud, on a deux circuits, l'une pour l'équation électrique et l'autre pour l'équation thermoélectrique.

Le circuit électrique simple est montré dans la Figure III.18:

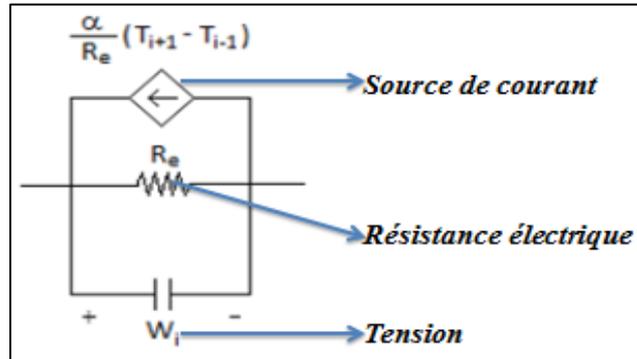


Figure III.1 : Circuit électrique équivalent [20].

Pour le circuit thermoélectrique, tous les termes thermoélectriques non linéaires regroupés en une seule source de courant entrant dans le nœud, comme illustré par la Figure III.19:

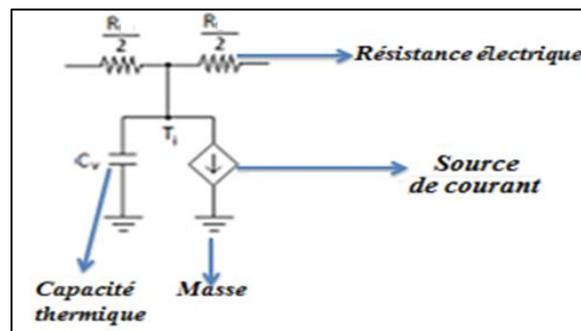


Figure III.2 : Circuit thermoélectrique équivalent [21].

Équations thermoélectriques à modéliser par Matlab et conditions aux limites

La modélisation comporte trois programmes, le premier appelé (thermoelectric1.m) est un programme principal et les deux autres (tension.m et Sfun.m) sont des sous-programmes.

▪ **Programme principale: thermoelectric1.m:**

Ce programme nous donne les valeurs de la quantité de la chaleur (Q) qui représente l'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique R en fonction du temps.

Le matériau thermoélectrique se trouve dans la zone II (Figure III.14) entre la zone I et II pour cela nous calculons la température aux limites de B et C (B ∈ à la zone I et C ∈ à la zone III) [22].

a) Conditions aux limites pour la température aux points de B et C: T_b, T_c

La température à la limite de B est donnée par l'équation suivante :

$$T_B = \left(R_{th}xN_{max} + R_{max}x(N_{max} + 1) + \frac{2\alpha R_{th}R_{max}x(N_{max} + 1)^2}{R_e} - \frac{R_{max} \alpha x(N_{max} + 1)x(N_{max} + 2N + N_{min} + 1)}{2R_e} \right) \times \frac{1}{R_{th} + R_{max}\alpha 2x \frac{(N_{max}+1)}{R_e}} \quad (III. 22)$$

- ✦ $x=0.16$: longueur du module thermoélectrique (m).
- ✦ $N=2$: Nombre d'éléments $N=N_b$.
- ✦ $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal.
- ✦ $R_e=5$: Résistance électrique (Ω).
- ✦ $R_{th}=5$: Résistance thermique ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- ✦ $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ α : Fonction de la température ($V/^\circ K$).

La température à la limite de C est donnée par l'équation suivante:

$$T_C = \left(R_{th}x (N_{max} + N + 1) + R_{min}x(N_{max} + N) + \frac{\alpha(N)^2 R_{th} R_{min} x (N_{max} + N)^2}{R_e} \right. \\ \left. + \alpha R_{th} R_{min} x \frac{(N_{max} + N)x (N_{max} + 2N + N_{min} + 2)}{2R_e} \right) \\ \times \frac{1}{R_{th} + R_{min} + \frac{\alpha(N)^2 R_{th} R_{min} x (N_{max} + N)}{R_e}} \quad (III. 23)$$

- ✦ $x=0.16$: longueur du module thermoélectrique (m).
- ✦ $N=2$: nombre d'éléments $N=N_b$.
- ✦ $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal.
- ✦ $R_e=5$: Résistance électrique (Ω).
- ✦ $R_{th}=5$: Résistance thermique ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- ✦ $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ α : Fonction de la température ($V/^\circ K$).
- ✦ $R_{min}=1$: Résistance thermique minimal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$) [23].

a) *Les fonctions dérivées*

Les fonctions dérivées sont reliés par la longueur du module thermoélectrique et le temps de la génération de puissance.

La première fonction dérivée est sous la forme suivante :

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{Q_{in} + \frac{x}{R_{max}}}{C_{max}} \quad (III. 24)$$

Avec :

- ✦ $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- ✦ t =temps de la simulation varie de : 0 jusqu'à 4000 s.
- ✦ $C_{max}=180/N_{max}$: Capacité thermique maximal ($j/^\circ K$).
- ✦ $Q_{in}=1$: Flux de chaleur d'entrée dans le sous-circuit thermique (W).

- ✦ $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ Q : Énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique R (W).

La deuxième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} - 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$dQ(x, t)(N_{max} - 1) = C_{max} \frac{x(N_{max}) - 2x + x(N_{max} - 1) + x(N_{max} - 2)}{R_{max}} \quad (III. 25)$$

La troisième fonction dérivée est une fonction de (N_{max}) donnée par l'équation suivante:

$$dQ(x, t)(N_{max}) = 2 \frac{T_B - x(N_{max})}{(N_{max})} - C_{max} \frac{x(N_{max}) - x(N_{max}) - 1}{(N_{max})} \quad (III. 26)$$

La quatrième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned} dQ(x, t)(N_{max} + 1) &= \frac{1}{R_e} (x(N_{max} + N + N_{min} + 1))^2 \\ &- \alpha x(N_{max} + N + N_{min} + 1) \frac{x(N_{max} + 2) + x(N_{max} + 1)}{2 - T_B} \\ &- \frac{\alpha(x(N_{max} + 2) + x(N_{max} + 1))}{2x(N_{max} + N + N_{min} + 2)} \\ &+ \frac{x(N_{max} + N + N_{min} + 1)}{2} - \frac{T_B x(2N + N_{max} + N_{min} + 1)}{R_e} + \frac{\alpha^2}{R_e} (x(N_{max} + 2) + x(N_{max} \\ &+ 1)) \frac{(x(N_{max} + 2) - x(N_{max} + 1))}{2 - 2T_B(x(N_{max} + 1) - T_B)} \\ &+ \frac{x(N_{max}+2)-x(N_{max}+1)}{R_{th}} + 2 \frac{T_B-x(N_{max}+1)}{R_{th}C_{th}} \end{aligned} \quad (III. 27)$$

La cinquième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N + N_{min} + 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N + N_{min} + 1) \\
 &= I - x \frac{(N_{max} + N + N_{min} + 1)}{R_e} \\
 &+ \alpha \frac{(x(N_{max} + 2)) + x(N_{max} + 1) R_e}{2 - T_B} \frac{R_e}{C_e} \quad (\text{III. 28})
 \end{aligned}$$

La sixième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N - 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N - 1) \\
 &= \frac{1}{R_e} (x(N + N_{min} + 1 + (N_{max} + N - 1)))^2 - \frac{1}{2} \alpha (N - 1) x(N + N_{min} + N_{max} + N \\
 &- 1) (x(N_{max} + N - 1 + 1) - x(N_{max} + N - 1 - 1)) - \alpha(N \\
 &- 1) \frac{x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1)}{2} \\
 &\times \frac{x(N + N_{min} + N_{max} + N) + x(N + N_{min} + N_{max} + N - 1)}{2} \\
 &- \left(\frac{x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N - 2)}{2} \right) \left(\frac{x(N + N_{min} + N_{max} + N - 1)}{2R_e} \right. \\
 &+ \left. \frac{x(N + N_{min} + N_{max} + N - 2)}{2R_e} \right) \\
 &+ \alpha \frac{(N - 1)^2 (x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1)) (x(N_{max} + N) - x(N_{max} + N - 1))}{R_e} \\
 &- \frac{(x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N - 2)) (x(N_{max} + N - 1) - x(N_{max} + N - 2))}{2} \\
 &+ C_{th} \frac{x(N_{max} + N) - 2x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N - 2)}{R_{th}} \quad (\text{III. 29})
 \end{aligned}$$

La septième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N - 1 + N + N_{min})$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N - 1 + N + N_{min}) \\
 &= \frac{I - x(N_{max} + N - 1 + N + N_{min})}{R_e} \\
 &+ C_e \frac{\alpha(N - 1 + N + N_{min})(x(N_{max} + N + N + N_{min}) - x(N_{max} + N - 2 + N + N_{min}))}{2R_e}
 \end{aligned}
 \tag{III. 30}$$

La huitième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + 2N + N_{min})$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + 2N + N_{min}) \\
 &= I - \frac{x(N_{max} + 2N + N_{min})}{R_e} \\
 &+ \frac{C_e}{R_e} \alpha(N) \left(T_c - \frac{x((N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1))}{2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III. 31}$$

La neuvième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N) \\
 &= \frac{1}{R_e} \left(x(N_{max} + 2N + N_{min})^2 - \alpha(N) x(N_{max} \right. \\
 &+ 2N + N_{min}) \left(T_C - \frac{x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1)}{2} \right) \Big) \\
 &- \alpha(N) \left(T_C x(2N + N_{max} + 2 + N_{min}) \right. \\
 &- \frac{x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N)}{2} \frac{x(N_{max} + 2N + N_{min}) + x(N_{max} + 2N + N_{min} - 1)}{2R_e} \Big) \\
 &+ \frac{(\alpha(N))^2}{R_e} (T_C - x(N_{max} + N)) \\
 &- \left(x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1) \left(\frac{x(N_{max} + N) - x(N_{max} + N - 1)}{2} \right) \right) \\
 &+ \frac{x(N_{max} + N - 1) - x(N_{max} + N)}{R_{th}} + 2 \frac{T_C - x(N_{max} + N)}{C_{th}R_{th}} \tag{III. 32}
 \end{aligned}$$

La dixième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N + 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N + 1) \\
 &= \frac{1}{C_{min}} \left(-2 \frac{x(N_{max} + N - 1) - T_C}{R_{min}} \right. \\
 &+ \left. \frac{x(N_{max} + N + 2) - x(N_{max} + N + 1)}{R_{min}} \right) \tag{III. 33}
 \end{aligned}$$

La onzième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N + N_{min} - 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N + N_{min} - 1) \\
 &= \frac{x(N_{max} + N + N_{min}) - 2x(N_{max} + N + N_{min} - 2)}{C_{min}R_{min}} \tag{III. 34}
 \end{aligned}$$

La douzième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N + N_{min})$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(N_{max} + N + N_{min}) \\
 &= \frac{x(N_{max} + N + N_{min} - 1) - x(N_{max} + N + N_{min})}{R_{min}} \\
 &+ 2 \frac{T_a - x(N_{max} + N + N_{min})}{R_{min}C_{min}} \quad (III. 35)
 \end{aligned}$$

La treizième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} + N + N_{min} + 1)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(2N + N_{max} + N + N_{min} + 1) \\
 &= \frac{I - \frac{2x(2N + N_{max} + N + N_{min} + 1)}{R_e} + \frac{2\alpha x(N_{max} + 1) - T_B}{R_e}}{C_e} \quad (III. 36)
 \end{aligned}$$

La quatorzième fonction dérivée est une fonction de $(2N + N_{max} + N + N_{min} + 2)$ donnée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 & dQ(x, t)(2N + N_{max} + N + N_{min} + 2) \\
 &= \frac{I - \frac{2x(2N + N_{max} + N + N_{min} + 2)}{R_e} + \frac{2\alpha (T_C - x(N_{max} + N))}{R_e}}{C_e} \quad (III. 37)
 \end{aligned}$$

Avec :

- ✦ t=temps de la simulation (s).
- ✦ $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- ✦ $N=2$: Nombre d'éléments $N=N_b$.
- ✦ $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal.

- ✦ $R_e=5$: Résistance électrique (Ω).
- ✦ $R_{th}=5$: Résistance thermique ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ $R_{min}=1$: Résistance thermique minimal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- ✦ $Q_{in}=1$: Flux de chaleur d'entrée dans le sous-circuit thermique (W).
- ✦ $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- ✦ α : Fonction de la température ($V/^\circ K$).
- ✦ $C_{max}=180/N_{max}$: Capacité thermique maximal ($j/^\circ K$).
- ✦ $C_{min}=40/N_{min}$: Capacité thermique minimale ($j/^\circ K$).
- ✦ $C_{th}=20/N$: Capacité du circuit thermique ($j/^\circ K$).
- ✦ $C_e=500e-5 \cdot N$: Capacité du circuit électrique (j/V).
- ✦ $I=0A$: Courant à ($t=0s$) du circuit électrique (A).
- ✦ $T_a=300$: Température ambiante ($^\circ K$) [24].

▪ **Sous-programme N°1: tension.m**

C'est un sous-programme utilisé pour calculer les valeurs des potentiels V_g formés par le générateur thermoélectrique.

-Les conditions initiales pour la température sont:

$$T_{initiale} = T_{ambiante} \quad (III. 38)$$

-Les conditions initiales pour la tension sont :

$$V_i = 0V \quad (III. 39)$$

$$V_g = \sum V(x(2N + N_{max} + N_{min})) \quad (III. 40)$$

- ✦ V_g : Potentiel formé par le générateur thermoélectrique (V).
- ✦ V : Tension (V).
- ✦ $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- ✦ $N=2$: Nombre d'éléments $N=N_b$.

- ✦ $N_{\max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- ✦ $N_{\min}=1$: Nombre d'élément minimal [25].

▪ **Sous-programme N°2: Sfun.m**

Ce sous-programme calcul le coefficient de Seebeck (S) en en fonction de la Température (T) ainsi que le courant généré par le générateur (thermoélectrique). Pour déterminer la qualité du matériau thermoélectrique le facteur du mérite (ZT) ainsi que le rendement de la thermo génération sont calculés au niveau de ce sous-programme.

A- *Le coefficient de Seebeck est donné par la relation suivante:*

$$S(T) = \alpha(T) = \frac{-\frac{73}{6 \times 10^{10}} T^3 + \frac{129}{2 \times 10^8} T^2 - \frac{47}{15 \times 10^5} T + \frac{21}{5000}}{0.82} \quad (\text{III. 41})$$

- ✦ T: Température °k.

Le courant généré (I) par ce générateur thermoélectrique est donné par l'équation suivante :

$$P = R I^2 \rightarrow I^2 = \frac{P}{R} \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (\text{III. 42})$$

- ✦ R: Résistance électrique (Ω).
- ✦ P: énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique R (W) [26].

B- *Le facteur de mérite est:*

$$ZT = TS^2 \frac{\sigma}{\lambda} \quad (\text{III. 43})$$

- ✦ T: la température absolue (°K).
- ✦ S: le coefficient de Seebeck (ou le pouvoir thermoélectrique) ($V \cdot ^\circ K^{-1}$).

- ✦ σ : la conductivité électrique ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).
- ✦ λ : la conductivité thermique ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}$) [27].

C-Rendement de la thermo génération (η)

(η) est défini comme le rapport entre la puissance électrique (P) générée par le module et la puissance thermique (Q_c) absorbée du côté chaud :

$$\eta(\%) = \frac{P}{Q_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \times \frac{\sqrt{(1 + ZT)} - 1}{\sqrt{(1 + ZT)} + \frac{T_f}{T_c}} \times 100 \quad (\text{III. 44})$$

Avec:

- ✦ ZT: le facteur de mérite.
- ✦ T_c : température côté chaud ($^\circ\text{K}$).
- ✦ T_f : température côté froid ($^\circ\text{K}$) [28].

Bibliographie:

- [1] J.P. Carmo, L.M. Goncalves, R.F. Wolffenbuttel, J.H. Correia, 'Aplanar thermoelectric power generator for integration in wearable Microsystems', *Sensors and Actuators, A*, Vol. 161, (2010), p 199.
- [2] J.A. Chávez, J.A. Ortega, M.A. Pérez, M.J. García, 'Low-Cost and Minimal-Conditioning Interface for aPbSe Photoconductor Array', *IEEE Trans. on Ins. And Meas.*, Vol. 46, No. 4, 1997.
- [3] J.A. Ortega, M.A. Pérez, M. García, J.A. Chávez, A. Moreno, 'Sensor Inteligente Detector de Gases. Subsistemas Óptico y Electrónica Analógica', Seminario anual de automática y electrónica industrial, pp. 303-306, Tarragona, Septiembre 1995.
- [4] Y. Mudryk, P. Rogl, C. Paul, S. Berger, E. Bauer, G. Hilscher, C. Godart, H. Noël, A. Saccone, R., 'Ferro Crystal chemistry and thermoelectric properties of clathrates with rare-earth substitution', *Physica B*, Vol. 328, pp. 44, (2003).
- [5] Y. Mudryk, P. Rogl, C. Paul, S. Berger, E. Bauer, G. Hilscher, C. Godart, H. Noël, A. Saccone, R., 'Ferro Crystal chemistry and thermoelectric properties of clathrates with rare-earth substitution', *Physica B*, Vol. 328, pp. 44, (2003).
- [6]-[7] Y. Mudryk, P. Rogl, C. Paul, S. Berger, E. Bauer, G. Hilscher, C. Godart, H. Noël, A. Saccone, R., 'Ferro Crystal chemistry and thermoelectric properties of clathrates with rare-earth substitution', *Physica B*, Vol. 328, pp. 44, (2003).
- [8]-[9] J.N. Humphrey, 'Optimization of lead sulfide infrared detectors under diverse operating conditions,' *Applied Optics*, Vol. 4, pp. 665-675, 1965.
- [10] T.H. Johnson, J.J. Long, C.d. Matteson, 'Lead selenide detector arrays,' *IRIS* Vol. 13, No. 1, 1969.
- [11] T.H. Johnson, 'Lead salt detectors and arrays; PbS and PbSe', *Proc. of the SPIE* 443, pp. 60-94, 1984.
- [12] T.J. Seebeck, 'Magnetische Polarisation der Metalle und Erse Durch Temperature-Differens, *Abhandlungen der Deutchen Akademie der Wissenschaften su Berlin*, 1822.
- [13-14] J.C. Peltier, 'Nouvelles experiences sur la caloricite des courans electriques', *Annales de chimie LVT*, 1934.
- [15-25] Marc D. Ulrich, William F. Seng, and Peter A. Barnes. 'One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE. In: *Journal of Computational Electronics* 1.3 (2002), pp. 431-434.

[26] D. Bérardan, E. Alleno, C. Godart, 'Mécanosynthèse de skutterudites thermoélectriques', matériaux 2006, 13-17 novembre, Dijon, France.

[27] S. Priya and D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies. Springer, 2008.

[28] V.D. Ros, 'Les matériaux thermoélectriques performants pour la génération d'électricité', matériaux 13-17 Novembre, Dijon, France, 2006.

Chapitre 4

RESULTATS

DE

LA SIMULATION

Cette partie présente une étude de simulation sur l'effet de la variation de la température sur un générateur thermoélectrique à la base des différents matériaux, en utilisant la méthode mathématique du modèle des éléments finis.

IV.1 Simulation de notre générateur par le modèle des éléments finis par le Matlab

Nos objectifs sont :

- ✦ *La comparaison entre les propriétés thermoélectriques à base des différents matériaux : BiTe (Bismuth-Tellure), SiGe (Silicium-Germanium), PbSe (Plomb-Sélénium), BiSb (Bismuth-Antimoine); les Chalcogénures de cuivre (BiCuSeO) ;*
- ✦ *Trouvé le meilleur matériau thermoélectrique;*
- ✦ *La comparaison entre les résultats de la modélisation et ceux de la théorie.*

IV.2 Effets étudiés

A- Effet Seebeck : $V=S \Delta T$

- ✦ *$v=f(\Delta T)$: la tension en fonction de la variation de température.*

B- Effet Peltier : $Q=\Pi \Delta T$

- ✦ *$I=f(\Delta T)$: le courant électrique en fonction de la variation de température.*
- ✦ *$W=f(\Delta T)$: la puissance générée en fonction de la variation de température.*

C- Les relations de Kelvin/Thomson : Effet Seebeck et Peltier : $ZT=f(\Delta T)$

$Rend=f(\Delta T)$

- ✦ *$ZT=f(\Delta T)$: la variation du facteur de mérite par effet Seebeck en fonction de la variation de température.*
- ✦ *$Rendement=f(\Delta T)$: la variation du rendement par l'effet Seebeck en fonction de la variation de température.*

IV.3 Les courbes de la modélisation

IV.3.1 Pour les anciens matériaux

IV.3.1.1 Effet Seebeck

- La courbe de tension en fonction de la variation de température : $V=f(\Delta T)$

La figure (1) de tension en fonction de la variation de la température montre que la tension est dépend de la température, donc cette caractéristique montre que le coefficient de Seebeck S du matériau est sensible à la température (T), le matériau qu'il a un bon coefficient de Seebeck c'est le BiTe, on peut écrire :

$$S (\text{BiTe}) > S (\text{SiGe}) > S (\text{PbSe}) > S (\text{BiSb}).$$

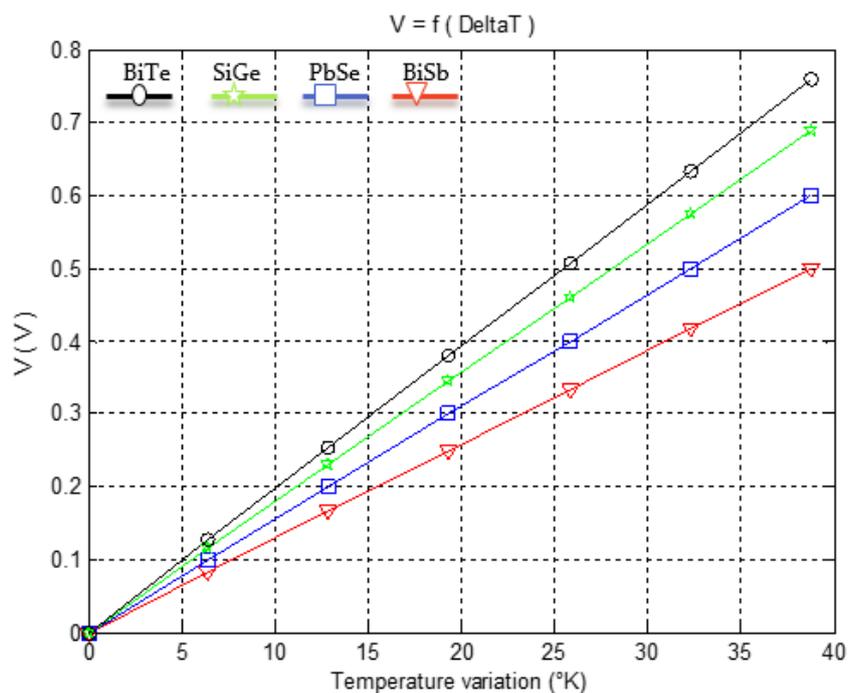


Figure IV.1 : Tension en fonction de la variation de température : $V=f(\Delta T)$

Lorsqu'un métal est soumis à un gradient de température ΔT , l'énergie moyenne des électrons étant plus élevée du côté chaud que du côté froid, il en résulte un gradient énergétique.

Celui-ci va donner naissance à une force qui va entrainer la diffusion des électrons du côté chaud vers le côté froid. Cette diffusion entraine la polarisation du matériau (accumulation des porteurs majoritaires négatifs du côté froid et les porteurs majoritaires positifs du côté chaud) qui induit un champ électrique dont l'effet est d'aider les électrons froids à diffuser vers le coté chaud, c'est ce qui est à l'origine de la variation de potentiel qui apparaît sur le générateur thermoélectrique.

IV.3.1.2 Effet Peltier

- **La caractéristique du courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$**

Par cette caractéristique en figure (2) on déduit que le comportement thermoélectrique dépend de la température du système ; ceci est dû essentiellement à l'effet Joule de la résistance électrique.

La génération du courant la plus importante se fait par le BiTe, donc il à un bon coefficient de Peltier, on peut écrire :

$$\Pi (\text{BiTe}) > \Pi (\text{SiGe}) > \Pi (\text{PbSe}) > \Pi (\text{BiSb})$$

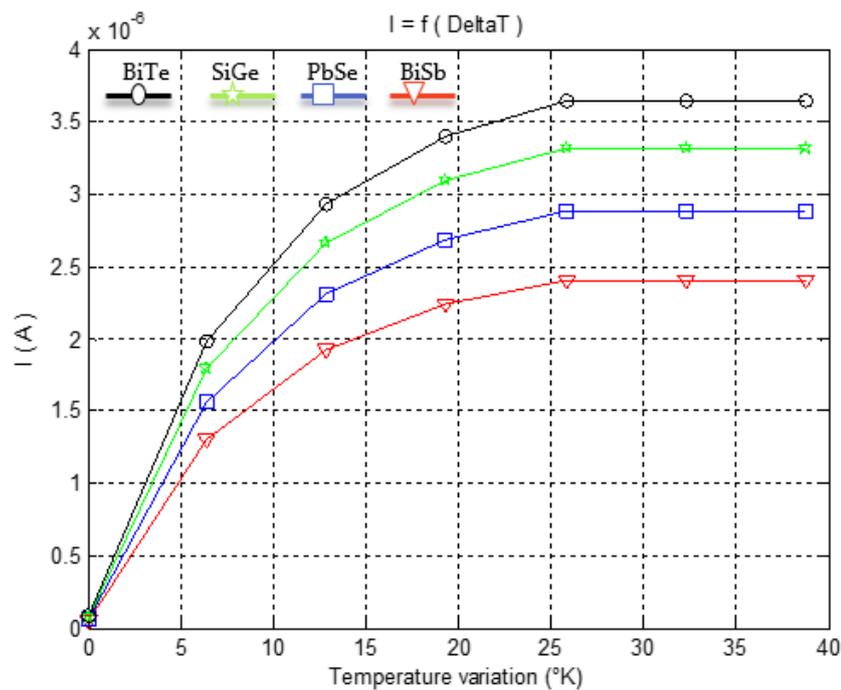


Figure IV.2 Courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$

Si l'on fait passer un courant dans un circuit avec 2 conducteurs différents ayant leur jonction à une même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre. Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p.

La jonction qui absorbe de la chaleur est alors celle dans laquelle le courant passe du matériau de type n au matériau de type p. Inversement celle qui la restitue est la jonction dans laquelle le courant passe du matériau de type p au matériau de type n . On a donc $T > T_1$.

- **La caractéristique de la puissance en fonction de la variation de la température :**
 $W=f(\Delta T)$

Cette caractéristique est montrée sur la figure (3), la puissance générée dépend en général du temps du système, la puissance la plus élevée est présentée par le BiTe.

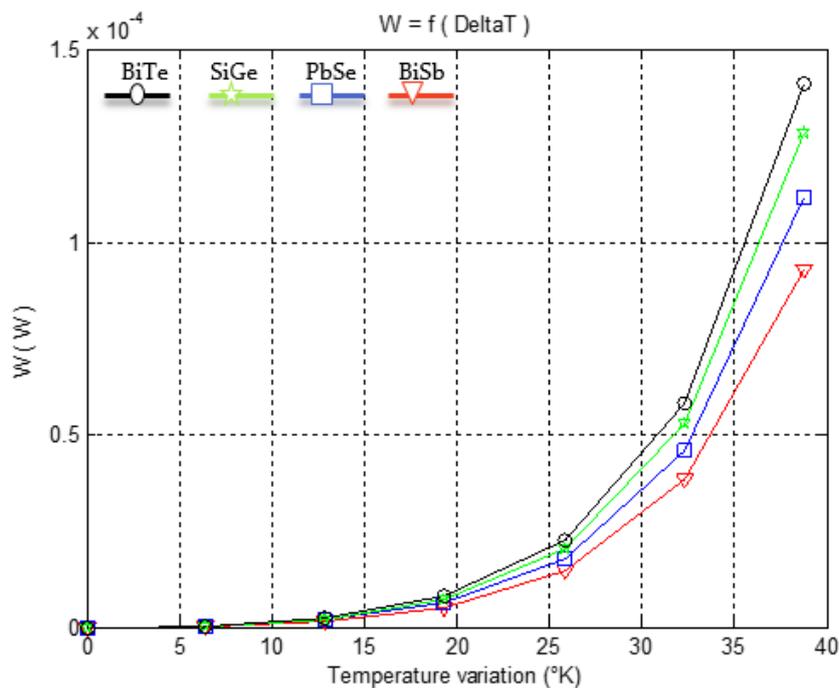


Figure IV.3. Puissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$

Un générateur thermoélectrique, est un petit module formé de deux plaques de céramique. Il est apparu que le flux thermique à l'intérieur d'un tel module TE, est le facteur responsable de la production d'électricité. C'est-à-dire qu'il doit y avoir transfert thermique entre les deux plaques de céramique.

Dans le cas où l'un des deux est de température supérieure au second il y a transfert thermique, c'est-à-dire que le corps le plus chaud va fournir de l'énergie au corps le plus froid, jusqu'à atteindre l'équilibre thermique.

IV.3.1.3 Relations de Kelvin/Thomson :

- La courbe de la variation du facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$

Cette caractéristique est présentée sur la figure (4), montre que la valeur maximale du facteur de mérite est égale à 1.25, qui correspondent au BiTe. Cette valeur dépend par le Coefficient de Seebeck et de Peltier.

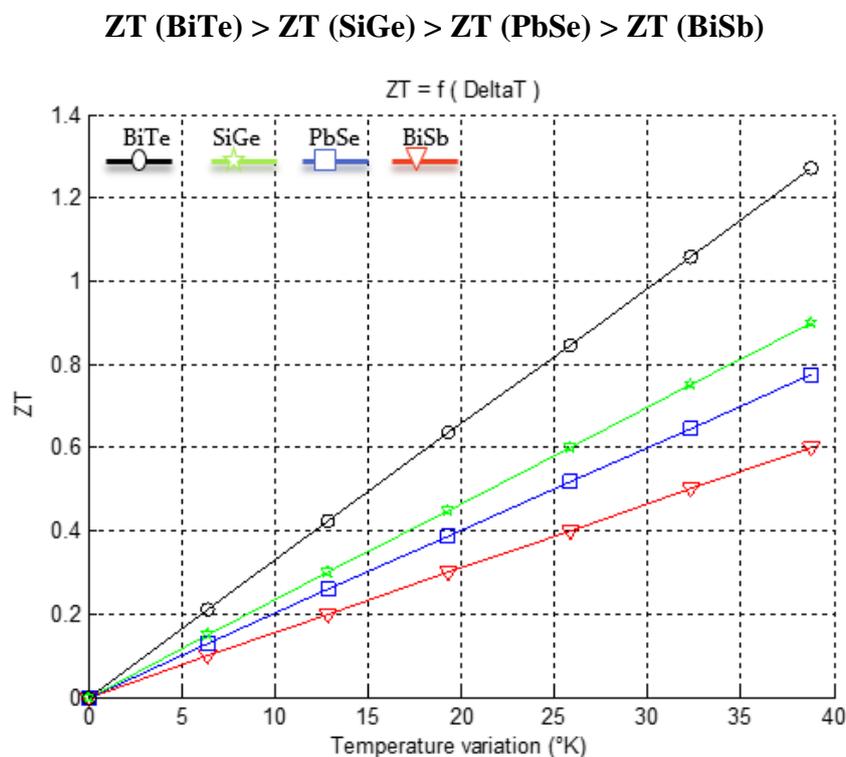


Figure IV.4. Facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$

Le facteur de mérite (ZT) définit si le matériau a de bonnes propriétés thermoélectriques ou non. Plus le facteur de mérite est élevé plus le matériau est bon. Un matériau est bon quand il a un pouvoir thermoélectrique élevé soit une conductivité électrique haute et une conductivité thermique faible. Les meilleurs matériaux actuels présentent des ZT légèrement supérieur à 1.

- **La courbe de la variation du rendement par l'effet Seebeck en fonction de la variation de température : rendement=f(ΔT)**

La figure (5) montre que la valeur maximale du rendement est égale **34,3%**, qui celle du BiTe, donc **34,3%** de l'énergie thermique est convertie en énergie électrique grâce au ce module thermoélectrique; cette valeur dépend du Coefficient de Seebeck et de Peltier.

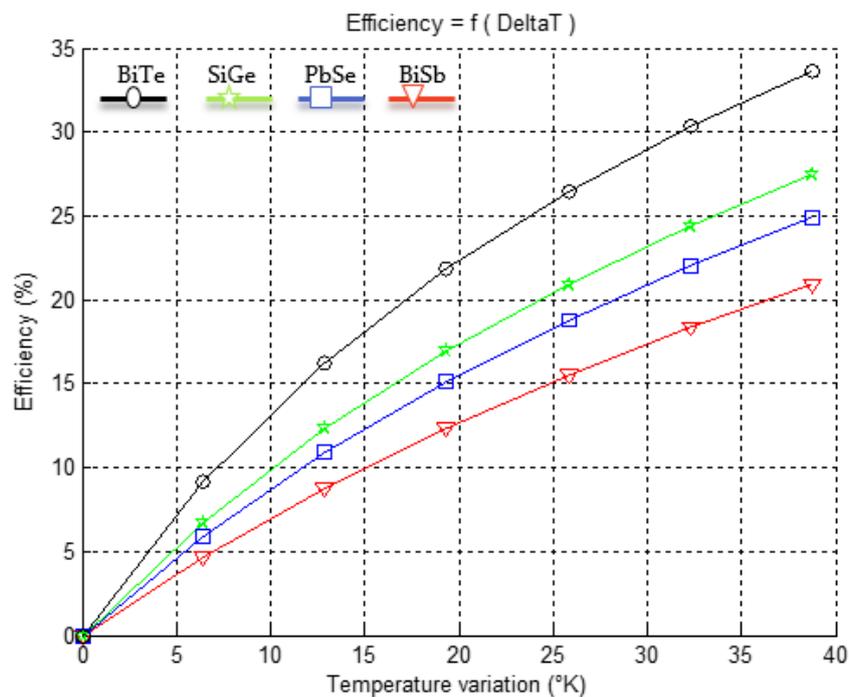


Figure IV.5. Variation du rendement en fonction de la variation de température :

$$\text{rendement} = f(\Delta T)$$

Le calcul du rendement de conversion d'un système thermoélectrique s'effectue en déterminant la relation entre le flux de chaleur et le courant électrique dans le matériau.

Il nécessite l'utilisation des relations de Seebeck, Peltier et Thomson ainsi de la variation de température ΔT .

IV.3.2 Pour un nouveau matériau 'BiCuSeO'

IV.3.2.1 Effet Seebeck

- La courbe de tension en fonction de la variation de température : $V=f(\Delta T)$: (Figure :6) ;

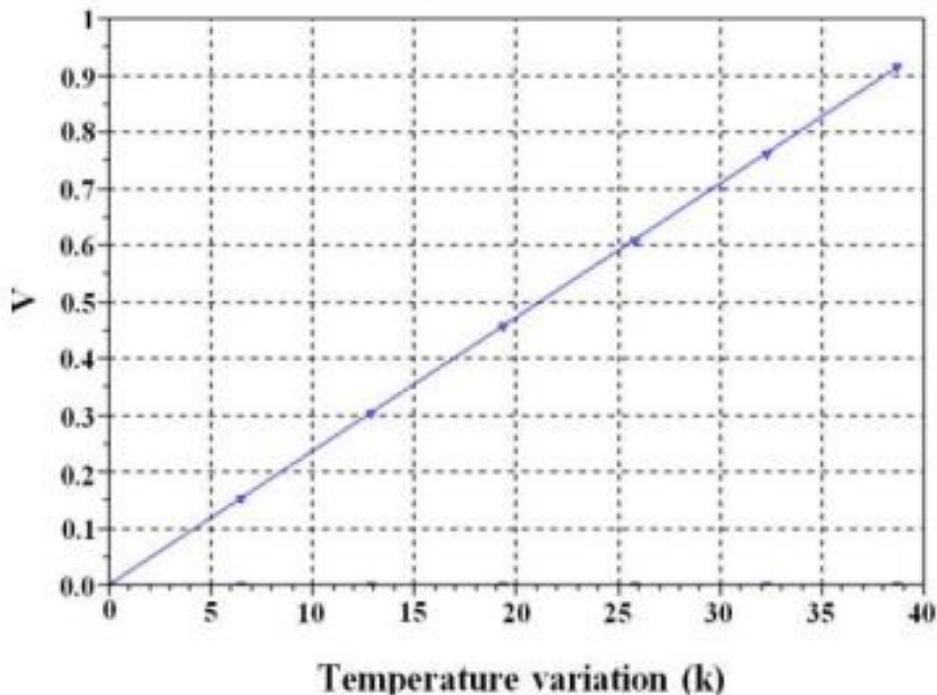


Figure IV.6. Tension en fonction de la variation de température : $V=f(\Delta T)$

Soit 2 matériaux a et b de nature différente reliés entre eux par 2 jonctions de température T. Une des jonctions est portée à la température T_1 tel que $T_1 > T$. Une variation de tension apparaît alors entre les jonctions froide et chaude. Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. L'effet Seebeck s'explique par la diffusion de porteur de charge, e^- (électrons) ou e^+ (trou) du côté chaud vers le côté froid.

Pour un circuit ouvert les e^- (électrons) se massent dans la partie froide du matériau de type n alors que les e^+ (trou) se trouvent dans la partie froide du matériau de type p. La partie

froide du semi-conducteur n sera donc polarisée négativement et celle du semi-conducteur p positivement. Nous sommes donc en présence d'une variation de charges qui a pour effet de créer une variation de potentiel entre les 2 extrémités froides de ces matériaux.

IV.3.2.Effet Peltier

- La caractéristique du courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de la température : $I=f(\Delta T)$: (Figure :7) ;

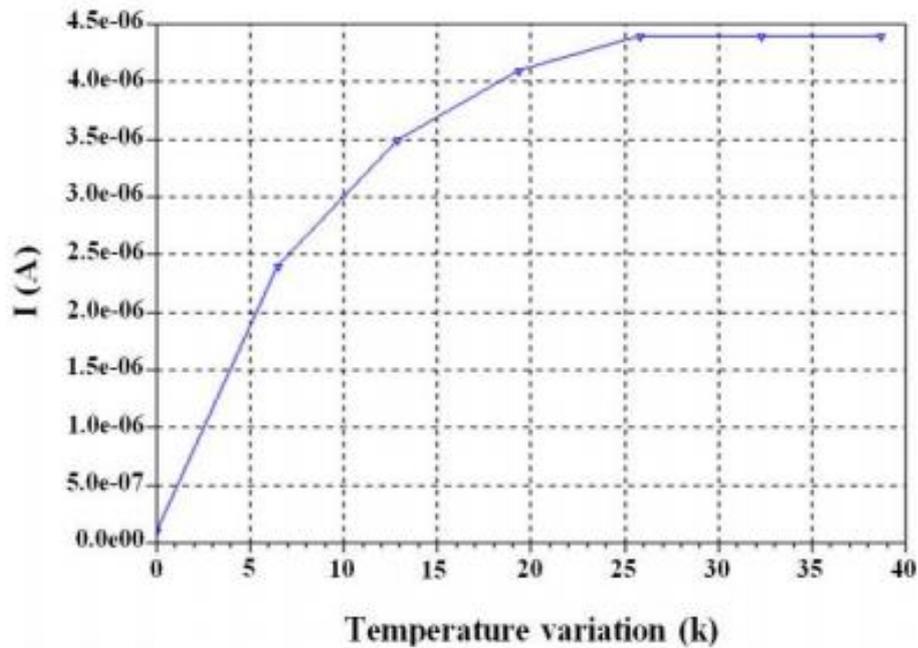


Figure IV.7. Courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la variation de température : $I=f(\Delta T)$

Lorsqu'un courant électrique passe à travers la jonction reliant deux conducteurs, on observe un dégagement de chaleur ou une absorption de chaleur selon le sens du courant. C'est le principe utilisé par les modules à effet Peltier, qui utilisent des semi-conducteurs dopés. En effet, un courant qui passe d'un matériau dopé positivement vers un matériau dopé négativement provoque un dégagement de chaleur.

Le sens conventionnel du courant étant le sens contraire des électrons, lorsque le courant passe d'un matériau de type p vers un matériau de type n, les électrons du matériau de type n vers un matériau de type p, c'est-à-dire qu'ils passent d'un milieu riche en électrons vers un milieu pauvre en électrons.

- La caractéristique de lapuissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$: (Figure :8) ;

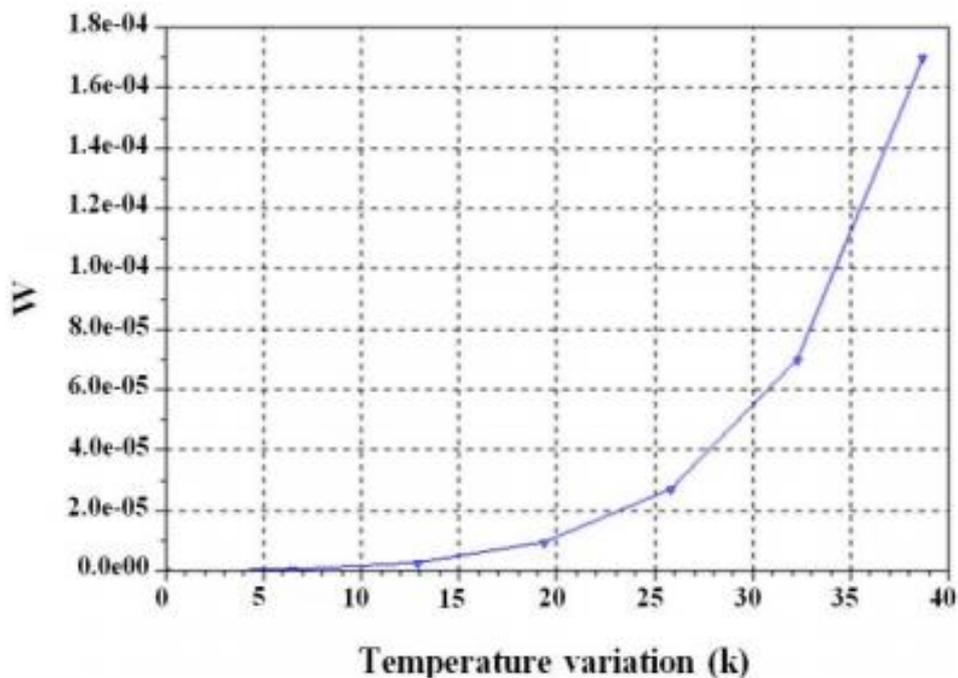


Figure IV.8. Puissance en fonction de la variation de la température : $W=f(\Delta T)$

Lorsque les électrons traversaient le matériau de type n, le milieu étant riche en électrons, il y avait plus de chocs entre les particules. Les électrons étaient donc porteurs d'une grande énergie cinétique.

En passant vers un milieu pauvre en électrons, les électrons subissent moins de chocs, et transmettent leur énergie cinétique dans la jonction entre les deux matériaux, cette perte d'énergie cinétique microscopique se traduisant par une augmentation de l'agitation thermique des particules au niveau de la jonction. Il y a donc un dégagement de chaleur.

Au contraire, lorsque les électrons passent d'un milieu pauvre en électrons vers un milieu riche en électrons, le courant imposant le passage dans le matériau dopé négativement, les électrons absorbent l'énergie cinétique des particules du milieu ambiant, gagnant l'énergie cinétique nécessaire au passage dans le matériau de type n.

IV.3.2.3 Relations de Kelvin/ Thomson

- La courbe de la variation du facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$: (Figure :9) ;

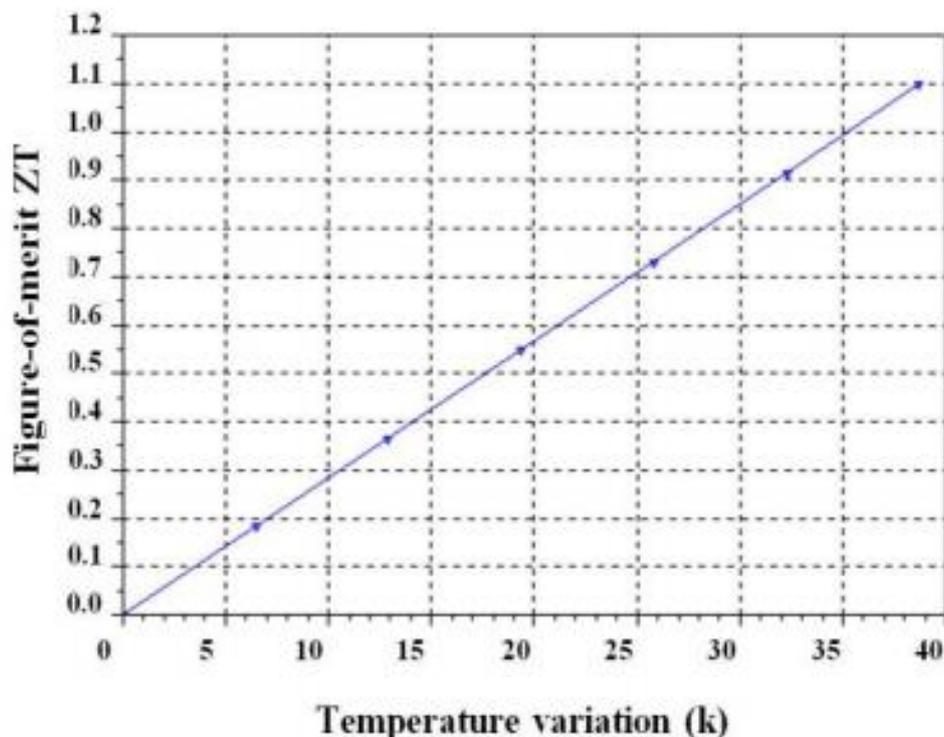


Figure IV.9.Facteur de mérite en fonction de la variation de température : $ZT=f(\Delta T)$

La figure (9) montre que le maximum du facteur de mérite est la valeur de 1.1. Thomson montra que les effets Seebeck et Peltier sont liés. On met cette correspondance en évidence lorsqu'on applique simultanément un gradient de température et un courant électrique.

La variation fondamentale avec les deux premiers effets est que ce dernier ne concerne qu'un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction ; en d'autres termes, l'effet

Thomson définit une chaleur absorbée ou dégagée par unité de temps lorsqu'un courant électrique I traverse une région d'un matériau ayant un gradient de température.

- La courbe de la variation du rendement par l'effet Seebeck en fonction de la variation de température : rendement= $f(\Delta T)$: (Figure :10) ;

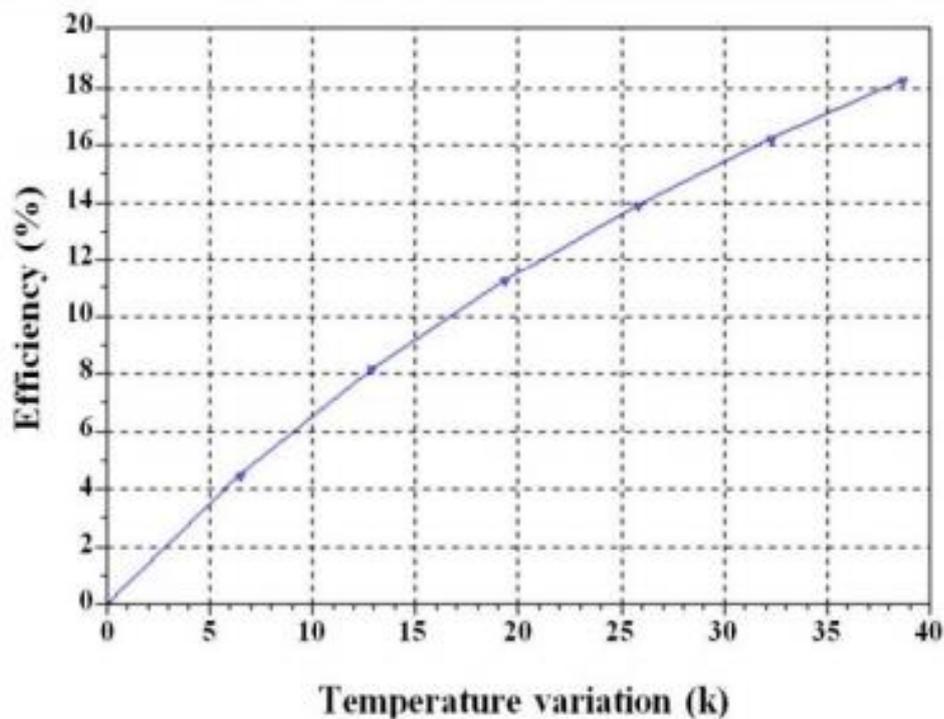


Figure IV.20. Variation du rendement en fonction de la variation de température :

$$\text{rendement}=f(\Delta T)$$

L'efficacité maximale est égale à 18,1% pour ce matériaux, donc **18,01%** de l'énergie thermique est convertie en énergie électrique, les thermocouples constitués de matériaux thermoélectriques efficaces peuvent faire bien plus utilisés comme de véritables machines thermiques, les thermocouples peuvent effectivement convertir de la chaleur en énergie électrique et inversement, en jouant avec les effets respectifs Seebeck et Peltier.

En général, les grand nombre de jonctions p-n au sein d'un même module permettent d'optimiser le rendement de conversion ou le coefficient de performance, selon la configuration utilisée.

IV.3.3 Comparaison entre la théorie et la modélisation

La comparaison est présentée sur le tableau (1) suivant ;

Matériaux thermoélectriques	ZT (Facteur de mérite)	
	Résultat de la modélisation	La théorie
BiTe	1.25	1.3
SiGe	0.9	0.95
PbSe	0.75	0.75
BiSb	0.6	0.6
BiCuSeO	1,1	1,1

Tableau IV.3 : Comparaison entre la théorie et la modélisation

La comparaison de la théorie avec notre simulation montre que : la valeur maximale du facteur de mérite trouvée par la méthode des éléments fini programmé par le Matlab pour déférente matériaux correspond à la valeur théorique pour chaque matériau thermoélectrique étudié.

IV.4 Conclusion

D'après nos travaux de simulation, le meilleur matériau thermoélectrique c'est le: BiTe car il possède :

- ✦ *Un bon coefficient de Seebeck : S ;*
- ✦ *Un bon coefficient de Peltier : Π ;*
- ✦ *Une grande puissance générée : W ;*
- ✦ *Une bonne conductivité électrique (σ) ;*
- ✦ *Une faible conductivité thermique (λ) ;*
- ✦ *La valeur maximale du facteur de mérite : ZT ;*
- ✦ *La valeur maximale du rendement.*

Les résultats obtenus montrent que les matériaux thermoélectriques sont classés selon leurs natures et leurs performances thermoélectriques, ces performances dépendent de la construction thermoélectrique pour chaque matériau.

Le matériau idéal doit donc présenter un fort coefficient Seebeck, une forte conductivité électrique et une faible conductivité thermique. Un fort coefficient Seebeck permet effectivement de générer une grande variation de potentiel. Une faible conductivité thermique permet de conserver le gradient thermique le plus élevé possible aux bornes du thermo-élément.

Enfin, une bonne conductivité électrique permet de limiter les pertes par effet Joule. Ces trois propriétés sont interdépendantes ce qui complique grandement l'optimisation d'un matériau. L'amélioration de l'un des paramètres altère généralement l'une des deux autres propriétés.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Après une longue période de stagnation, la thermoélectricité a connu ces quinze dernières années un regain d'intérêt et d'activité à l'échelle mondiale. Ceci a été essentiellement motivé par la découverte de nouveaux matériaux possédant des performances accrues. C'est dans ce contexte que se situe notre travail avec l'étude des matériaux thermoélectriques.

Les objectifs de notre travail sont l'étude et la modélisation et la conception d'un générateur thermoélectrique, on s'est intéressé à la modélisation et au dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique par la méthode des éléments finis pour différentes matériaux.

Une partie importante de ce travail a consisté en l'étude de la thermoélectricité, ainsi que les effets thermoélectriques tels que l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson pour lesquels nous avons donné une explication physique et les relations de Kelvin. Par la suite nous avons mentionné les coefficients à optimiser dans le but d'avoir un bon matériau thermoélectrique et donc un facteur de mérite ZT élevé.

Notre simulation est basée sur l'étude de la thermoélectricité, ainsi que les effets thermoélectriques tels que l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson et les relations de Kelvin/Thomson. On s'intéressée principalement à l'optimisation de plusieurs paramètres, dont le facteur de mérite afin d'avoir un bon matériau thermoélectrique.

D'après notre résultat : le meilleur matériau thermoélectrique c'est le: BiTe car il a ;

- ✦ *Un bon coefficient de Seebeck : S ;*
- ✦ *Un bon coefficient de Peltier : Π ;*
- ✦ *Une grande puissance générée : W ;*
- ✦ *Une bonne conductivité électrique (σ) ;*
- ✦ *Une faible conductivité thermique (λ) ;*
- ✦ *La valeur maximale du facteur de mérite : ZT ;*
- ✦ *La valeur maximale du rendement.*

Conclusion générale

Les résultats obtenus montrent que les matériaux thermoélectriques sont classés selon leur nature et leur performance thermoélectrique, dépend de la construction thermoélectrique pour chaque matériau.

Le matériau idéal doit donc présenter un fort coefficient Seebeck, une forte conductivité électrique et une faible conductivité thermique. Un fort coefficient Seebeck permet effectivement de générer une grande différence de potentiel. Une faible conductivité thermique permet de conserver le gradient thermique le plus élevé possible aux bornes du thermo-élément.

Enfin, une bonne conductivité électrique permet de limiter les pertes par effet Joule. Ces trois propriétés sont interdépendantes ce qui complique grandement l'optimisation d'un matériau. L'amélioration de l'un des paramètres altère généralement l'une des deux autres propriétés.

Comme perspectives nous envisageons la réalisation d'un générateur thermoélectrique.

- ✦ Ceci est essentiellement motivé par la découverte des nouveaux matériaux possédant des performances accrues.
- ✦ L'inconvénient majeur des cellules photovoltaïques est lié à leur rendement. En effet, seule une partie du rayonnement incident peut être convertie en électricité, de plus les radiations non converties échauffent le panneau ce qui réduit encore le rendement. Une solution à ce problème est de concevoir un module hybride thermoélectrique-photovoltaïque permettant d'obtenir un bon rendement.

PRODUCTIONS

SCIENTIFIQUE

▪ **Publication:**

- ✦ **International Journal of heat and technology: Vol.37, No. 3, September, 2019, pp. 727-737:**

Study of Temperature Variation Effect on the Thermoelectric Properties of a Thermoelectric Generator with BiCuSeO Molecules

Ibtissem Sifi^{1*}, Nassera Ghellai¹, Abdelkader Hima², Younes Menni¹, Ali J. Chamkha³, Giulio Lorenzini⁴

¹ Unit of Research on Materials and Renewable Energies, Department of Physics, Faculty of Sciences, Abou Bekr Belkaid University, B.P. 119, Tlemcen 13000, Algeria.

² University of El Oued, Faculty of Technology, 39000 El-Oued, Algeria.

³ Mechanical Engineering Department, Prince Sultan Endowment for Energy and Environment, Prince Mohammad Bin Fahd University, Al-Khobar 31952, Saudi Arabia.

⁴ Department of Engineering and Architecture, University of Parma, Parco Area delle Scienze, 181/A, Parma 43124, Italy.

▪ **Conferences:**

- ✦ **STEMA 2017 : Le 4^{ème} Séminaire sur les technologies Mécaniques Avancées held in Tlemcen, Algeria, 14-15 Novembre 2017.**

Étude et Modélisation d'un Générateur Thermoélectrique

Ibtissem Sifi, Nassera Ghellai

Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, Département de Physique Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, B.P: 119 Tlemcen 13000, Algérie.

- ✦ **ISIEAM 2018: International Seminar in Industrial Engineering and Applied Mathematics held in Skikda, Algeria, 23-24 October 2018.**

L'influence de la température sur un générateur thermoélectrique

Ibtissem Sifi, Nassera Ghellai

Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, Département de Physique Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, B.P: 119 Tlemcen 13000, Algérie.

- ✦ **IC-AIRES 2018: 2^{ème} International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systemesheld in Tipaza, Algeria24-26 Novembre 2018.**

Modeling of a thermoelectric generator

Ibtissem Sifi, Nassera Ghellai

Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, Département de Physique Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, B.P: 119 Tlemcen 13000, Algérie.

- ✦ **ICEMAEP'2019: International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution, held in 22-24 Octobre 2019 in Constantine, Algeria.**

Les propriétés thermoélectriques pour un générateur thermoélectrique

Ibtissem Sifi, Nassera Ghellai

Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, Département de Physique Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, B.P: 119 Tlemcen 13000, Algérie.

- ✦ **1st international symposium 'Environment and Sustainable development', Relizane, 10-11 Februry 2020**

L'étude des caractéristiques thermoélectriques pour un générateur thermoélectrique

Ibtissem Sifi, Nassera Ghellai

Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, Département de Physique Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, B.P: 119 Tlemcen 13000, Algérie.

Study of Temperature Variation Effect on the Thermoelectric Properties of a Thermoelectric Generator with BiCuSeO Molecules

Ibtissem Sifi^{1*}, Nassera Ghellai¹, Abdelkader Hima², Younes Menni¹, Ali J. Chamkha³, Giulio Lorenzini⁴

¹ Unit of Research on Materials and Renewable Energies, Department of Physics, Faculty of Sciences, Abou Bekr Belkaid University, B.P. 119, Tlemcen 13000, Algeria

² University of El Oued, Faculty of Technology, 39000 El-Oued, Algeria

³ Mechanical Engineering Department, Prince Sultan Endowment for Energy and Environment, Prince Mohammad Bin Fahd University, Al-Khobar 31952, Saudi Arabia

⁴ Department of Engineering and Architecture, University of Parma, Parco Area delle Scienze, 181/A, Parma 43124, Italy

Corresponding Author Email: ibtissemSifi2019@gmail.com

<https://doi.org/10.18280/ijht.370308>

ABSTRACT

Received: 2 June 2019

Accepted: 2 September 2019

Keywords:

semiconductor, energy conversion, temperature, thermoelectric generator, finite element model, BiCuSeO

Thermoelectric-power generation poses challenges, which are of fundamental and technological nature. Increasing thermoelectric efficiency for work, the theme of the associated policy, has encountered problems related, for example, to heat recovery and conversion to electricity. It is widely recognized that the augmentation of efficient electromechanical systems as a strategic subject of applied study in light of problems related, for example, to waste heat recuperation and conversion to electricity. This results in an abundant literature on the subject. Recent advances in the technological development of TEGs are based on advances in materials science: new materials and new techniques for the production of specific structures have made it possible to improve device performance through the characterization and optimization of their thermal and electrical transport properties. This paper presents a simulation study on the effect of temperature variation on a thermoelectric generator at the base of BiCuSeO, using the mathematical method of the finite element model.

1. INTRODUCTION

Energy recovery is a good way to overcome battery limitations. Energy from various sources of ambient forms such as vibration, heat and noise can be transformed to electrical energy through energy recovery. Among these sources of ambient energy, we can note thermal energy which can be converted into electrical energy using a thermoelectric generator. Glatz et al. [1] presented a novel polymer based wafer level fabrication process for micro thermoelectric generators (μ TEGs) for the application on non-planar surfaces. In that study, the generators were fabricated by subsequent electrochemical deposition of Cu and Ni in a 190- μ m thick flexible polymer mold formed by photolithographic (PL) patterning of SU-8. Their results showed that the thermocouple length should be in the range of 80-150 μ m when the best thermoelectric bulk material (BiTe) is used and realistic interface condition are assumed. Shittu et al. [2] numerically investigated a segmented asymmetrical thermoelectric generator (SASTEG) to optimize its electrical performance and mechanical reliability under transient and steady state conditions. They studied and compared the thermal and electrical performance of the SASTEG and TEG under transient and steady state heating conditions. Their results showed that the optimized SASTEG provided a power output enhancement of 117.11 % compared to that of the conventional TEG under rectangular pulsed heat condition. Kim et al. [3] reported a glass fabric-based flexible TE generator prepared using a screen printing technique and the self-sustaining structure of a TE device without top and

bottom substrates. They showed an allowable bending radius of as low as 20 mm and no change in performance by repeated bending for 120 cycles. Zappa et al. [4] synthesized and preliminarily investigated Zinc oxide (ZnO, n-type) and copper oxide (CuO, p-type) nanowires as innovative materials for the fabrication of a proof-of-concept thermoelectric device. Thacher et al. [5] conducted a study to measure the automobile exhaust thermoelectric generator (AETEG)'s performance and its effect on the truck systems as well as to determine which factors are important for optimizing an AETEG design. Other studies can be found [6-24].

In this work, we present a simulation study on the effect of temperature variation on a thermoelectric generator at the base of BiCuSeO, using the mathematical method of finite element model. We studied thermoelectric effects: Seebeck effect Peltier effect, Thomson and Kelvin relation. The results of the simulation obtained are in good agreement with the experimental and theoretical data available. Matlab has been used in the current calculation.

2. MATERIALS AND METHODS

Figure 1a presents the energy fluxes in a thermoelectric device; there is a thermal flux from a thermal source. While a part of this thermal flux is transformed into an electric energy flux within the thermoelectric material. A thermal drain absorbs the remaining thermal energy. In Figure 1b the electrical and thermal part is plotted separately in a

composite component model, where the properties of spatially distributed material, such as electrical and thermal conductivity, are expressed by aggregating elements.

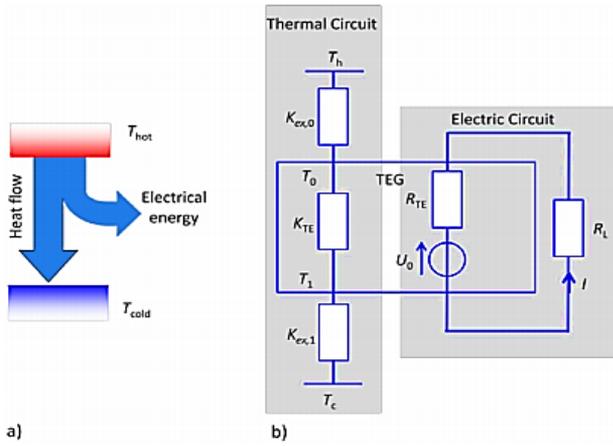


Figure 1. (a) the energy fluxes within a thermoelectric conversion process, (b) the thermal and electrical part separately in a lumped element model

2.1 Method of finite volume model of thermoelectric module

Due to the phenomenon of electron and phonon transport in conductors and semiconductors, heat flux and electrical current are, in general, coupled and linear functions of the electric field and the gradient of temperature:

$$J = \sigma E - \sigma \alpha \nabla T \quad (1)$$

$$q = \pi J - K \nabla T \quad (2)$$

However, even without knowing exactly what the coefficients α , π , σ , k are, it is clear from Eqs. (1) and (2) that in any material which allows both electrical and heat conduction.

The system for the method of “Finite Volume Model of Thermoelectric Module” consists of three domains with four boundaries. The sub-domains and their equations as represent in Figure 2.

Sub-domain: I	Sub-domain: II	Sub-domain: III
$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T)$	$\sigma E - \sigma \alpha \nabla T + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} J$	$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T)$
	$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[(k + \sigma \alpha^2 T) \nabla T - \sigma \alpha T E \right] + \sigma E^2 - \sigma \alpha E \nabla T$	

Figure 2. Sub-domain equations

Sub-domains I and III represent sink and the heat source, respectively, and sub-domain II represents the thermoelectric material. Figure 2 represents the time-dependent equations that are obtained by substituting Eqs. (1) and (2) for the conservation of heat flux and the load equations 3 and 4 presented below:

$$\nabla J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$q + \rho C_v \frac{dT}{dt} = \dot{Q} = EJ \quad (4)$$

The thermal boundary conditions are:

1- A: Heat flux q_0 is imposed:

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \quad (5)$$

2- B: Heat is continuous across the interface flux balance; A current J_0 is imposed $J = J_0$.

3- C: Heat is continuous across the interface flux balance; a voltage V_0 is imposed $V = 0$.

4- D: Temperature T_{amb} is imposed $T = T_{amb}$.

It is assumed that k , ρ , C_v , ϵ and σ are constant within each sub-domain; they can and will differ between domains due to material differences. In sub-domain II, $\alpha = \alpha_T$: a function of temperature and k , ρ , C_v are constants.

Figure 3 indicates the temperature dependence of the thermoelectric generator properties for $\text{Bi}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CuSeO}$ samples.

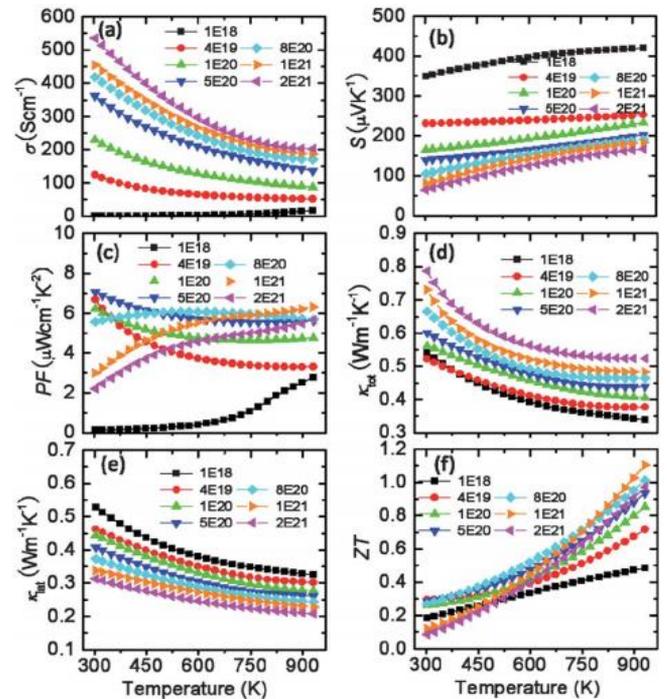


Figure 3. Thermoelectric properties of $\text{Bi}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CuSeO}$ as a function of temperature, (a) electrical conductivity, (b) Seebeck coefficient, (c) power factor, (d) total thermal conductivity, (e) Lattice thermal conductivity, (f) Figure of merit ZT

2.2 Boundary conditions for temperature at points B and C: T_b , T_c

The temperature at the B limit is given by the following equation:

$$T_B = \left(R_{th} x N_{max} + R_{max} x N_{max} + 1 + \frac{2\alpha R_{th} R_{max} x N_{max} + 1^2}{R_e} - \frac{R_{max} \alpha x N_{max} + 1 x N_{max} + 2N + N_{min} + 1}{2R_e} \right) \times \frac{1}{R_{th} + R_{max} \alpha 2x \frac{N_{max} + 1}{R_e}} \quad (6)$$

The temperature at the C limit is given by the following equation:

$$T_C = \left(R_{th} x N_{max} + N + 1 + R_{min} x N_{max} + N + \frac{\alpha(N)^2 R_{th} R_{min} x N_{max} + N^2}{R_e} + \alpha R_{th} R_{min} x \frac{N_{max} + N x N_{max} + 2N + N_{min} + 2}{2R_e} \right) \times \frac{1}{R_{th} + R_{min} + \frac{\alpha N^2 R_{th} R_{min} x N_{max} + N}{R_e}} \quad (7)$$

2.3 Derived functions

The derived functions are connected by the length of the thermoelectric module and the time of the generation of power: [25]

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{Q_{in} + \frac{x}{R_{max}}}{C_{max}} \quad (8)$$

$$dQ(x, t) N_{max} - 1 = C_{max} \frac{x N_{max} - 2x + x N_{max} - 1 + x N_{max} - 2}{R_{max}} \quad (9)$$

$$dQ(x, t) N_{max} = 2 \frac{T_B - x N_{max}}{N_{max}} - C_{max} \frac{x N_{max} - x N_{max} - 1}{N_{max}} \quad (10)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + 1 = \frac{1}{R_e} (x N_{max} + N + N_{min} + 1)^2 - \alpha x (N_{max} + N + N_{min} + 1) \frac{x N_{max} + 2 + x N_{max} + 1}{2 - T_B} - \frac{\alpha x N_{max} + 2 + x N_{max} + 1}{2x(N_{max} + N + N_{min} + 2)} + \frac{x(N_{max} + N + N_{min} + 1)}{2} - \frac{T_B x(2N + N_{max} + N_{min} + 1)}{R_e} + \frac{\alpha^2}{R_e} x N_{max} + 2 + x N_{max} + 1 \frac{x N_{max} + 2 - x N_{max} + 1}{2 - 2T_B(x N_{max} + 1) - T_B} + \frac{x(N_{max} + 2) - x(N_{max} + 1)}{2} + \frac{R_{th}}{2 \frac{T_B - x(N_{max} + 1)}{R_{th} C_{th}}} \quad (11)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + N + N_{min} + 1 = I - x \frac{N_{max} + N + N_{min} + 1}{R_e} + \alpha \frac{(x N_{max} + 2) + x N_{max} + 1}{2 - T_B} \frac{R_e}{C_e} \quad (12)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + N - 1 = \frac{1}{R_e} (x(N + N_{min} + 1 + N_{max} + N - 1))^2 - \frac{1}{2} \alpha N - 1 x N + N_{min} + N_{max} + N - 1 x N_{max} + N - 1 + 1 - x N_{max} + N - 1 - 1 - \alpha N - \frac{1}{2} \frac{x N_{max} + N + x N_{max} + N - 1}{2} \times \frac{x N + N_{min} + N_{max} + N + x N + N_{min} + N_{max} + N - 1}{2} - \left(\frac{x N_{max} + N - 1 + x N_{max} + N - 2}{2} \right) \left(\frac{x N + N_{min} + N_{max} + N - 1}{2 R_e} + \frac{x N + N_{min} + N_{max} + N - 2}{2 R_e} \right) + \alpha \frac{(N - 1)^2}{R_e} \frac{x N_{max} + N + x N_{max} + N - 1}{2} \frac{x N_{max} + N - x N_{max} + N - 1}{2} - \frac{x N_{max} + N - 1 + x N_{max} + N - 2}{2} \frac{x N_{max} + N - 1 - x N_{max} + N - 2}{2} + C_{th} \frac{x N_{max} + N - 2 x N_{max} + N - 1 + x N_{max} + N - 1 + x N_{max} + N - 2}{R_{th}} \quad (13)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + N - 1 + N + N_{min} = \frac{I - x N_{max} + N - 1 + N + N_{min}}{R_e} + C_e \frac{\alpha N - 1 + N + N_{min} x N_{max} + N + N + N_{min} - x N_{max} + N - 2 + N + N_{min}}{2 R_e} \quad (14)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + 2N + N_{min} = I - \frac{x N_{max} + 2N + N_{min}}{R_e} + \frac{C_e}{R_e} \alpha(N) \quad (15)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + N = \frac{1}{R_e} \left(x(N_{max} + 2N + N_{min})^2 - \alpha(N) x N_{max} + 2N + N_{min} \left(T_C - \frac{x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1)}{2} \right) \right) - \alpha(N) \left(T_C x 2N + N_{max} + \frac{2 + N_{min} - x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N)}{2} \frac{x(N_{max} + 2N + N_{min}) + x(N_{max} + 2N + N_{min} - 1)}{2 R_e} \right) + \frac{(\alpha(N))^2}{R_e} (T_C - x(N_{max} + N)) - \left(x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1) \right) \frac{(x(N_{max} + N) - x(N_{max} + N - 1))}{2} + \frac{x(N_{max} + N - 1) - x(N_{max} + N)}{R_{th}} + 2 \frac{T_C - x(N_{max} + N)}{C_{th} R_{th}} \quad (16)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + N + 1 = \frac{1}{C_{min}} \left(-2 \frac{x(N_{max} + N - 1) - T_C}{R_{min}} + \frac{x(N_{max} + N + 2) - x(N_{max} + N + 1)}{R_{min}} \right) \quad (17)$$

$$dQ(x, t) N_{max} + N + N_{min} - 1 = \frac{x N_{max} + N + N_{min} - 2x N_{max} + N + N_{min} - 2}{C_{min} R_{min}} \quad (18)$$

$$\frac{dQ(x, t) N_{max} + N + N_{min}}{R_{min}} = \frac{dQ(x, t) N_{max} + N + N_{min}}{R_{min} C_{min}} + 2 \frac{T_a - x N_{max} + N + N_{min}}{R_{min} C_{min}} \quad (19)$$

$$dQ(x, t) 2N + N_{max} + N + N_{min} + 1 = I - \frac{2x 2N + N_{max} + N + N_{min} + 1}{R_e} + \frac{2\alpha x N_{max} + 1 - T_B}{R_e} \frac{C_e}{C_e} \quad (20)$$

$$dQ(x, t) 2N + N_{max} + N + N_{min} + 2 = I - \frac{2x 2N + N_{max} + N + N_{min} + 2}{R_e} + \frac{2\alpha T_C - x N_{max} + N}{R_e} \frac{C_e}{C_e} \quad (21)$$

The initial conditions for the temperature are:

$$T_{initiale} = T_{ambiante}$$

The initial conditions for the voltage are:

$$V_i = 0V$$

$$V_g = \sum V x 2N + N_{max} + N_{min} \quad (22)$$

The current generated I by this thermoelectric generator is given by the following equation:

$$P = R I^2 \rightarrow I^2 = \frac{P}{R} \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (23)$$

The merit factor is:

$$ZT = TS^2 \frac{\sigma}{\lambda} \quad (24)$$

The efficiency of a thermoelectric generator depends on the merit factor of the material [26]:

$$\eta\% = \frac{P}{Q_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \times \frac{\sqrt{(1+ZT)} - 1}{\sqrt{(1+ZT)} + \frac{T_f}{T_c}} \times 100 \quad (25)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Seebeck effect $V=f(\Delta T)$ depending voltage with the temperature

The curve shows that the voltage is temperature dependent, so this characteristic in Figure 4 shows that the Seebeck coefficient is sensitive to the temperature T.

The Seebeck effect is the transformation of the temperature gradient between the junctions of different metals into an electrical voltage in the milli-volt range of a difference in temperature. Effect is nonlinear with the temperature is depends on the construction of the materials. The Seebeck coefficient S is the amount of voltage difference ΔV generated for an applied temperature difference ΔT .

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (26)$$

The voltage difference is calculate using the following equation [27]

$$V = \int_{T_c}^{T_h} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (27)$$

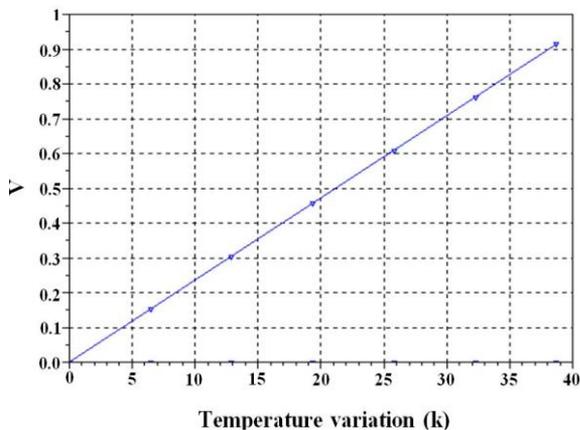


Figure 4. Depending voltage with the temperature

3.2 Peltier effect

3.2.1 $I=f(\Delta T)$, depending electric current with the temperature

Figure 5 shows that the Peltier effect is that a current cause a temperature difference between the junctions of two different metals.

The heat transfer is in the direction of charge carriers. The following equation represents the thermal current density, where j and π are the electrical current density and the Peltier coefficient [28].

$$q = \pi j \quad (28)$$

The thermoelectricity is a nonlinear effect in temperature and voltage, at low currents and temperature differences the nonlinearity is small, and the rough location of the peak, equation 9 represent the power in terms of current:

$$I_{P_{max}} \approx \frac{\alpha \Delta T}{2R_{te}} \quad (29)$$

where, R_{te} is the electrical resistance of the thermoelectric module [29].

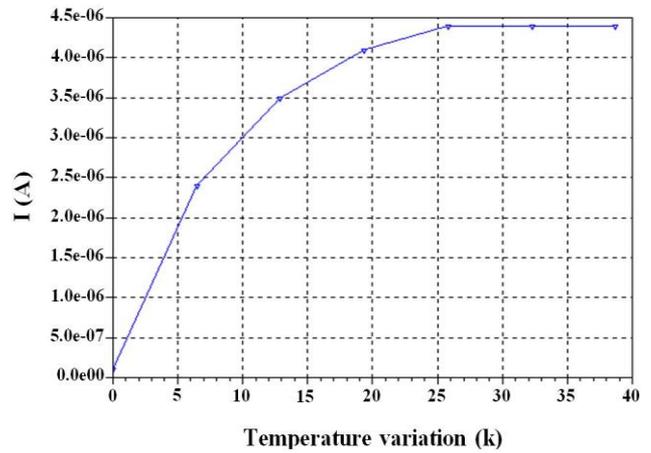


Figure 5. Depending electric current with the temperature

3.2.2 $W=f(\Delta T)$, depending power generated with the temperature

The power generated show in Figure 6, for heat is distributed equally to both ends of the leg requires a high thermal conductivity.

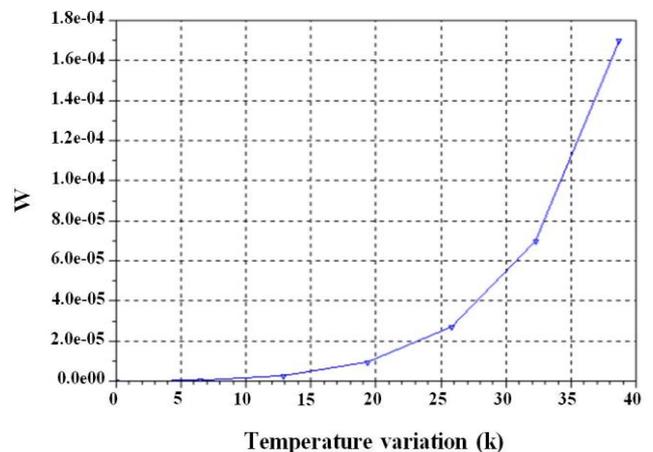


Figure 6. Depending power generated with the temperature

The thermal conductivity follows the Fourier process with its heat transfer, Q_{tc} described by:

$$Q_{tc} = -\Delta T K_{tc} \quad (30)$$

where, ΔT is the difference between the hot side and cold side temperature and K is the thermal conductivity, when the electric current flows the Joule effect is generated internally. This effect is on both hot side and cold side with amount of energy as:

$$Q_{joule} = I^2 R \quad (31)$$

where, R is the electrical resistance. The Peltier effect is the heating effect when the electric current passes two dissimilar junctions and the total heat transfer is represented by:

$$Q_{Peltier} = \alpha \Delta T I \quad (32)$$

where, α is the Seebeck coefficient. The Seebeck effect is a phenomenon in that a difference in temperature between two dissimilar semiconductors produces a difference in voltage

between its two junctions. Seebeck coefficient is also defined as [30].

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \quad (33)$$

3.3 Thomson and Kelvin relation

3.3.1 $\eta=f(\Delta T)$, depending efficiency with the temperature shown in Figure 7, the maximum efficiency is equal 18.1 %. The Thomson Effect is the heat flow across a conductor, with terminals at different temperatures, due to current flow.

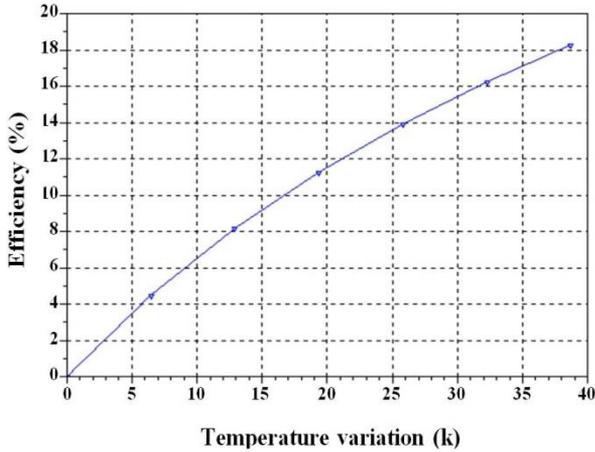


Figure 7. Depending efficiency with the temperature

The heat flow is given by:

$$\frac{dQ}{dx} = \mu I \frac{dT}{dx} \quad (34)$$

For a given material the Thomson effect is the only measurable effect because the other effects are related to pairs of materials. The following equations represent the Thomson/Kelvin relationship for three thermoelectric effects.

$$\pi = ST \quad (35)$$

$$\mu = T \frac{dS}{dT} \quad (36)$$

S, π , μ , T are the Seebeck coefficient, the Peltier coefficient, the Thomson coefficient, and the absolute temperature.

The efficiency of a thermoelectric generator depends on the merit factor of the material.

3.3.2 $ZT=f(\Delta T)$, depending figure of merit with the temperature.

TEGs consist of a cold junction and a hot junction and use the temperature variation between each junction to generate electrical current. Figure 8 shows that the maximum merit value is 1.1.

The properties of the materials and the structure of the device are factors which define the efficiency of the energy conversion. A good thermoelectric material must be possessed of a low thermal conductivity, a high Seebeck coefficient and a high electrical conductivity [31].

The suitability of a thermoelectric material is usually evaluated by the dimensionless thermoelectric figure-of-merit.

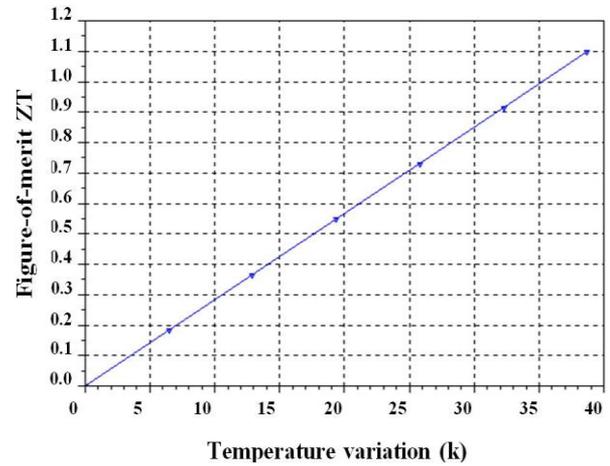


Figure 8. Depending figure of merit with the temperature

4. CONCLUSION

The new properties of those material structures of the materials are factors that exhibit the energy conversion efficiency of the TEGs. To ameliorate its efficiency, the material needs a high electrical conduction and a good Seebeck coefficient and low thermal conductivity.

The results obtained show the Seebeck coefficient is sensitive to the temperature; he depends on the construction of the materials. The Peltier effect causes a temperature difference between the junctions of two different metals.

Electricity materials could be a parameter that shows that the energy potential conversion is restricted. According to the energy conversion potency is limited.

On the other hand, the efficiency of a thermoelectric generator depends on the merit factor of the material Based on these results, to have a good thermoelectric material it is necessary to have a low thermal conductivity, a high Seebeck coefficient and a high electrical conductivity.

REFERENCES

- [1] Glatz, W., Muntwyler, S., Hierold, C. (2006). Optimization and fabrication of thick flexible polymer based micro thermoelectric generator. *Sensors and Actuators A*, 132: 337-345. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.024>
- [2] Shittu, S., Li, G., Zhao, X., Ma, X., Akhlaghi, Y.G., Ayodele, E. (2019). Optimized high performance thermoelectric generator with combined segmented and asymmetrical legs under pulsed heat input power. *Journal of Power Sources*, 428: 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.099>
- [3] Kim, S.J., We, J.H., Cho, B.J. (2014). A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. *Energy Environ. Sci.*, 7: 1959-1965. <https://doi.org/10.1039/c4ee00242c>
- [4] Zappa, D., Dalola, S., Faglia, G., Comini, E., Ferroni, M., Soldano, C., Ferrari, V., Sberveglieri, G. (2014). Integration of ZnO and CuO nanowires into a thermoelectric module. *Beilstein Journal Nanotechnol*, 5: 927-936. <https://doi.org/10.3762/bjnano.5.106>
- [5] Thacher, E.F., Helenbrook, B.T., Karri, M.A., Richter, C.J. (2007). Testing of an automobile exhaust

- thermoelectric generator in a light truck. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 221: 95-107. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO51>
- [6] Ming, T., Yang, W., Wu, Y., Xiang, Y., Huang, X., Cheng, J., Li, X., Zhao, J. (2017). Numerical analysis on the thermal behavior of a segmented thermoelectric generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(5): 3521-3535. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.021>
- [7] Ouyang, Z., Li, D. (2018). Design of segmented high-performance thermoelectric generators with cost in consideration. *Applied Energy*, 221: 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.106>
- [8] Ge, Y., Liu, Z., Sun, H., Liu, W. (2018). Optimal design of a segmented thermoelectric generator based on three-dimensional numerical simulation and multi-objective genetic algorithm. *Energy*, 147: 1060-1069. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.099>
- [9] Shittu, S., Li, G., Zhao, X., Ma, X. (2019). Series of detail comparison and optimization of thermoelectric element geometry considering the PV effect. *Renewable Energy*, 130: 930-942. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.002>
- [10] Li, G., Shittu, S., Ma, X., Zhao, X. (2019). Comparative analysis of thermoelectric elements optimum geometry between Photovoltaic-thermoelectric and solar thermoelectric. *Energy*, 171: 599-610. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.057>
- [11] Elsheikh, M.H., Shnawah, D.A., Sabri, M.F.M., Said, S.B.M., Hassan, H.M., Bashir, A.M.B., Mohamad, M. (2014). A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30: 337-355. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.027>
- [12] He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., Zhao, X. (2015). Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 143: 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.075>
- [13] Sornek, K., Filipowicz, M., Zołądek, M., Kot, R., Mikrut, M. (2019). Comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with wood-fired stove. *Energy*, 166: 1303-1313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.140>
- [14] Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140: 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
- [15] Fernandez-Yanez, P., Armas, O., Capetillo, A., Martínez-Martínez, S. (2018). Thermal analysis of a thermoelectric generator for light-duty diesel engines. *Applied Energy*, 226: 690-702. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.114>
- [16] Kempf, N., Zhang, Y. (2016). Design and optimization of automotive thermoelectric generators for maximum fuel efficiency improvement. *Energy Conversion and Management*, 121: 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.035>
- [17] Suarez, F., Nozariasbmarz, A., Vashae, D., Oztürk, M.C. (2016). Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics. *Energy Environmental Science*, 9: 2099-2113. <https://doi.org/10.1039/c6ee00456c>
- [18] Qing, S., Rezanian, A., Rosendahl, L.A., Gou, X. (2018). Design of flexible thermoelectric generator as human body sensor. *Mater. Today Proc.*, 5(4): 10338-10346. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.282>
- [19] Francioso, L., De Pascali, C., Farella, I., Martucci, C., Creti, P., Siciliano, P., Perrone, A. (2010). Flexible thermoelectric generator for wearable biometric sensors. *Sensors*, 2010 IEEE, 196: 747-750. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2010.5690757>
- [20] Riffat, S.B., Ma, X. (2003). Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23: 913-935. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
- [21] Li, G., Shittu, S., Diallo, T.M.O., Yu, M., Zhao, X., Ji, J. (2018). A review of solar photovoltaic thermoelectric hybrid system for electricity generation. *Energy*, 158: 41-58. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>
- [22] Nazri, N.S., Fudholi, A., Bakhtyar, B., Yen, C.H., Ibrahim, A., Ruslan, M.H., Mat, S., Sopian, K. (2018). Energy economic analysis of photovoltaic-thermal-thermoelectric (PVTTE) air collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92: 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.061>
- [23] Anoune, K., Bouya, M., Astito, A., Ben Abdellah, A. (2018). Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93: 652-673. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.032>
- [24] Mitrani, D., Salazar, J., Turo, A., Garcia, M.J., Chavez, J.A. (2002). One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE. *Microelectronics Journal*, 40: 1398-1405. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2008.04.001>
- [25] Bérardan, D., Alleno, E., Godart, C. (2006). Mécanosynthèse de skutterudites thermoélectriques. *Matériaux*, 13-17, Dijon, France.
- [26] Priya, S., Inman, D.J. (2008). *Energy Harvesting Technologies*. Springer.
- [27] Ziman, J. (1960). *Thermoelectrics, Basic Principles and New Material Development*. Oxford: Oxford Clarendon Press.
- [28] Gang, C. (2005). *Nanoscale Energy Transport and Conversion*, Oxford: University Press.
- [29] Yehea, A. (2013). *Thermoelectric devices cooling and power generation*, Center of Nanoelectronics and Devices. The American University in Cairo, Egypt.
- [30] Yusop, A., Mohamed, R., Ayob, A. (2013). Model building of thermoelectric generator exposed to dynamic transient sources. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 53(1): 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/53/1/012015>
- [31] Lossec, M., Multon, B., Ben Ahmed, H., Goupil, C. (2010). Thermoelectric generator placed on the human body: System modeling and energy conversion improvements. *The European Physical Journal Applied Physics*, 52(1): 11103. <https://doi.org/10.1051/epjap/2010121>

ملخص

منذ أوائل 1990 تجدد الاهتمام بالكهرباء الحرارية، خصوصا بسبب ظهور المخاوف البيئية نظرا للغازات المستخدمة في التبريد والانبعاث المسببة للاحتباس الحراري والرغبة في تطوير مصادر الطاقات البديلة.

تكوين تيار بفضل الكهرباء الحرارية يبدو مثيرا للاهتمام لأنه سوف يخفف من مشاكل مصدر الطاقة الحالية، وسوف يمكننا من الاستفادة من كميات هائلة من الحرارة التي تولدها السيارات،.....إلى طاقة مفيدة.

أهداف العمل لدينا هي تصميم و نمذجة مولد الحرارة. وهكذا، بعد إدخال أساسيات كهرباء حرارية من المشاركة أيضا الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الحرارية والتطبيقات الحرارية الحالية، وتهتم في النمذجة والتصميم بواسطة ماتلاب من مولد الحرارة.

الكلمات الدالة: كهرباء حرارية، المواد، المميزات، ماتلاب.

Résumé

Depuis le début des années 1990, un regain d'intérêt pour la thermoélectricité est apparu, dû en particulier à l'émergence des préoccupations environnementales concernant les gaz utilisés en réfrigération et les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la volonté de développer des sources d'énergies alternatives. La génération de courant par effet thermoélectrique apparaît comme une source intéressante pour soulager les problèmes énergétiques actuels, en mettant à profit la transformation des énormes quantités de chaleur perdues dégagées par exemple par les voitures,.....en énergie utile.

Les objectifs de notre travail sont l'étude et la modélisation d'un générateur thermoélectrique. Ainsi, après avoir présenté les notions de base de la thermoélectricité, passant également en revue les propriétés physiques et chimiques des matériaux thermoélectriques et les applications thermoélectriques actuelles, on s'est intéressé à la modélisation et au dimensionnement par Matlab d'un générateur thermoélectrique.

Mots clés : Thermoélectricité, Matériaux, Caractéristiques, Matlab.

Abstract

Since the early 1990, a renewed interest in thermoelectricity appeared, especially due to the emergence of environmental concerns gases used in refrigeration and emissions of greenhouse gas emissions and the desire to develop alternative sources of energy.

The current generation by thermoelectric effect appears as an interesting relieve current energy source problems, leveraging the processing huge amounts of waste heat generated by example cars,.... into useful energy.

The objectives of our work are the design and modeling of a thermoelectric generator. Thus, after introducing the basics of thermoelectricity from also review the physical and chemical properties of thermoelectric materials and thermoelectric current applications, is interested in the modeling and design by Matlab of a thermoelectric generator.

Key words: Thermoelectricity, Materials, Characteristics, Matlab.